

Aalto-yliopisto

Insinööritieteiden korkeakoulu

Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma

Anniina Koikkalainen

# Lämpöverkko hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvassa järjestelmässä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 11.5.2015

Valvoja: Professori Risto Lahdelma

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Tiina Sekki

<b>Tekijä</b> Anniina Koikkalainen		
<b>Työn nimi</b> Lämpöverkko hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvassa järjestelmässä		
<b>Koulutusohjelma</b> Energia- ja LVI-tekniikka		
<b>Pääaine</b> Energiatekniikka		<b>Koodi</b> K3007
<b>Työn valvoja</b> Professori Risto Lahdelma		
<b>Työn ohjaaja</b> Diplomi-insinööri Tiina Sekki		
<b>Päivämäärä</b> 30.4.2015	<b>Sivumäärä</b> 94 (103)	<b>Kieli</b> suomi

## Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli tutkia lämpöverkon merkitystä ja keskeisiä ominaisuuksia hajautetun lämmöntuotannon kannalta. Tutkimus liittyy kiinteistöyhtiö Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n projektiin Energiaomavarainen Otaniemi 2030. Hajautetulla lämmöntuotannolla tarkoitetaan tässä työssä alle 20 MW:n lämmöntuotantoa, kuten maalämpöä, lämpökeskuksia, aurinkolämpöä ja hukkalämmön lähteitä.

Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuustutkimusta ja soveltavaa Excel-pohjaista laskelmaa. Kirjallisuustutkimuksessa lähteinä käytettiin alan kirjallisuutta, tieteellisiä artikkeleja ja alan toimijoiden aiheeseen liittyviä aineistoja.

Lämpöverkon merkitystä maalämpöinvestoinnille tutkittiin soveltaen Otaniemeen. Tutkimuskohteena oli 29 Kiinteistöyhtiön omistamaa rakennusta ja niiden vuoden 2012 toteutuneet kulutukset. Laskelmassa verrattiin yhteensä 11,3 MW:n maalämpökaivojen käyttöä jokaisessa rakennuksessa ja vain 10 rakennuksessa. Laskelman perusteella 10 rakennuksen järjestelmiä voitaisiin hyödyntää vuodessa 19 000 MWh enemmän, mikäli kaikki rakennukset pystyisivät käyttämään niitä lämpöverkon välityksellä. Yhteensä tutkittujen rakennusten lämmöntarve oli tutkittuna vuonna 46 160 MWh.

Tutkimuksen kirjallisen osion perusteella lämpöverkon keskeisin ominaisuus hajautetun lämmöntuotannon kannalta on lämpötilataso. Aurinkolämmön ja maalämmön hyötysuhde ja rakennusten ja teollisuuden lämmönlähteiden hyödynnettävyys ovat sitä paremmat, mitä matalammassa lämpötilassa lämpö on tuotettava.

Koko tutkimuksen perusteella lämpöverkko voi tukea hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvaa järjestelmää. Lämpöverkko mahdollistaa lämmön tuottamisen siellä, missä on tilaa ja parhaat tuotanto-olosuhteet. Lämpöverkko mahdollistaa lämpövarastojen alueellisen keskittämisen. Lämpöverkko voi edistää maalämpöinvestoinnin tehokkaampaa hyödyntämistä alueellisesti.

Vaikka tulevaisuudessa energiantuotannon painopiste muuttuisi kohti paikallisia tuotantotapoja, ei tämä kehitys poista tarvetta lämpöverkolle. Päinvastoin lämpöverkon merkitys korostuu hajautettua lämmön-tuotantoa tukevana osana energijärjestelmää.

**Avainsanat** hajautettu lämmöntuotanto, maalämpö, aurinkolämpö, ylijäämälämpö, avoin kaukolämpöverkko, älykäs kaukolämpöverkko



---

**Author** Anniina Koikkalainen

---

**Title of thesis** Heating network for a decentralised heat production system

---

**Degree programme** Degree Programme in Energy and HVAC-Technology

---

**Major** Energy Technology

**Code** K3007

---

**Thesis supervisor** Professor Risto Lahdelma

---

**Thesis advisor** M. Sc. Tiina Sekki

---

**Date** 30.4.2015

**Number of pages** 94 (103)

**Language** Finnish

---

### Abstract

The aim of this thesis was to study the significance and the most important properties of heating network in a decentralized heat production system. In this thesis decentralized heat production means local heat production under 20 MW, such as geothermal heat, solar heat, heat produced at heating plants and small-scale CHP-plants and surplus heat. The thesis is related to Aalto University Properties' goal of energy self-sufficient Otaniemi by 2030.

The methods used in this thesis are literature survey and applied calculations to Otaniemi heating network. In the literature survey literature, scientific articles and other materials provided by the actors of the field were studied.

The significance of heating network for exploiting a geothermal system investment was studied in an applied calculation to Otaniemi area. The heat demand of 29 buildings owned by Aalto University Properties was used as the heat sink in the calculation and the heat source was a 11,3 MW geothermal system consisting of several geothermal heat pumps. According to the calculation, the geothermal system could be used 19 000 MWh more in a year if 10 of the buildings had their own system but the heat could be transferred to other buildings too compared to a situation where no heat could be transferred to other buildings. The total annual heat demand of the studied buildings was 46 000 MWh.

According to the literature survey, the most important property of the heating network relative to decentralized heat production is the temperature level of the network. The lower the temperature level of produced heat has to be, the better are both efficiency and usability of solar heat, geothermal heat and excess heat.

Heating network can play a significant role in a heating system based on decentralized heat production. The network enables the use of decentralized heat not only in separate buildings but also locally in several buildings according to the heat demands. In heating network the distributed heating sources can be built where there is enough space and best production circumstances. The heating network also enables using larger centralized heat storages locally. The heat storages are very beneficial in a heating system based on decentralized sources.

---

**Keywords** decentralized heat production, open district heating network, smart district heating network, solar heat, geothermal heat, surplus heat

---

# Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset .....	6
1.3	Tutkimusaineisto ja menetelmät.....	7
1.4	Tutkimuksen rajaukset .....	7
2	Hajautettu lämmöntuotanto .....	9
2.1	Pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotanto ja lämpökeskukset.....	9
2.2	Lämpökeskukset.....	14
2.3	Aurinkolämpö.....	14
2.4	Maalämpö.....	17
2.5	Hukkalämmön hyödyntäminen .....	19
3	Lämmön tuotannon ja kulutuksen tasaus.....	22
3.1	Tasaustarve.....	22
3.2	Lämpövarastot tasaustapana.....	26
3.3	Muut lämmöntasaustavat.....	31
4	Lämmön siirto lämpöverkon avulla.....	35
4.1	Lämpöverkko ja kaukokylmäverkko.....	35
4.2	Lämpötehon siirto lämpöverkossa .....	39
4.3	Lämpöverkko ja hajautettu lämmöntuotanto kirjallisuudessa.....	42
4.4	Hajautetun lämmöntuotannon ja rakennusten kytkeminen verkkoon .....	44
4.5	Lämpötilataso lämpöverkossa .....	51
4.6	Häviöt.....	60
5	Soveltavat laskelmat Otaniemessä.....	64
5.1	Lämpöverkon merkitys maalämpöä hyödyntävässä järjestelmässä Otaniemessä.....	64

5.2	Lämpötilatason vaikutus lämpöverkon lämpöhäviöihin Otaniemessä	70
6	Tulokset .....	78
6.1	Lämpötilataso lämpöverkon merkittävin ominaisuus .....	78
6.2	Lämpöverkon merkitys energiaomavaraisuuden kannalta .....	79
6.3	Lämpöverkon merkitys hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämisessä 81	
7	Johtopäätökset.....	85
7.1	Tulosten pohdinta.....	85
7.2	Suositukset .....	86
7.3	Jatkotutkimus .....	87

## Liitteet

Liite 1: Erään lämpöputkivalmistajan lämpöputkien painehäviökuvaaja

Liite 2: Kiinteistöyhtiön omistamien rakennusten lämmönkulutusten korrelaatiomatriisi

## Esipuhe

Työn aiheen sain Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n Energiaomavarainen Otaniemi 2030 -projektiin liittyen ja olen hyvin kiitollinen mahdollisuudesta edistää projektia oman työni avulla.

Haluan kiittää diplomityöni valmistumisesta Jumalaa, äitiä, edesmennyttä isääni ja miestäni Rikua (kuva 1).



Kuva 1. Erityisesti mieheni Riku tuki diplomityöni tekoa.

Tärkeää tukea ja sparrausta olen saanut ohjaajaltani Tiina Sekiltä ja esimieheltäni Satu Kankaalta sekä myös muilta Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n työntekijöiltä. Valvojani Risto Lahdelma auttoi jatkojalostamaan laskelmiani ja antoi neuvoja työn edistymiseen ja rajaukseen sekä lähtötilanteen määrittelyyn. Tutkijatohtori Genku Kayo antoi idean laskelmiini. Lisäksi kiitän Fortumin Niko Wirgentiusta haastattelusta avoimeen lämpöverkkoon liittyen.

Espoossa 11.5.2015

Anniina Koikkalainen

## Käytetyt symbolit ja muuttujat

$COP_{ideaali}$	Ideaali lämpöpumpun muuntosuhde.
$Q_L$	Lämpöpumpun lämpimään systeemiin viety lämpömäärä (J)
$Q_K$	Lämpöpumpun kylmästä systeemistä ottama lämpömäärä (J)
$T_L$	Lämpöpumpussa lämpimän systeemin lämpötila (K)
$T_K$	Lämpöpumpun kylmän systeemin lämpötila (K)
$\eta_T$	Lämpövaraston lämpötilahyötysuhde
$T_1$	Lämpövaraston alkulämpötila (K)
$T_y$	Lämpövarastoa ympäröivän ympäristön lämpötila (K)
$T_1'$	Lämpövaraston loppulämpötila (K)
$\eta_Q$	Lämpövaraston energiahyötysuhde
$Q_{purettu}$	Lämpövarastosta purettu lämpömäärä (J)
$Q_{ladattu}$	Lämpövarastoon ladattu lämpömäärä (J)
$T_1$	Lämpövaraston alkulämpötila purettaessa (K)
$T_2$	Lämpövaraston loppulämpötila purettaessa (K)
$T_1'$	Lämpövaraston alkulämpötila ladattaessa (K)
$T_2'$	Lämpövaraston loppulämpötila ladattaessa (K)
$c_p$	Veden ominaislämpökapasiteetti J/kg
$\dot{m}$	veden massavirta kg/s
$\Phi_{verkko}$	Lämpöverkon läpi kulkeva lämpövirta
$\rho$	Veden tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
$A$	Putken poikkileikkauksen pinta-ala
$w$	putken läpi virtaavan nesteen keskimääräinen virtausnopeus virtaussuunnassa
$D$	Lämpöputken sisähalkaisija
$r$	Lämpöverkon risteilykerroin tai samanaikaisuuskerroin
$\phi_{tot,maxi}$	Koko lämpöverkon toteutunut huippulämpöteho
$\phi_{i,max}$	Yksittäisen lämmönkuluttajan huippulämpöteho
$\varepsilon$	Tehokerroin = keskiteho/maksimiteho
$n$	Lämmönkuluttajien lukumäärä
$\eta_c$	Aurinkokeräimen Hottel-Whillier-Bliss –hyötysuhde
$\eta_0$	Aurinkokeräimen hyötysuhteen lämpötilasta riippumaton vakio-termi
$T_m$	Aurinkokeräinnesteen keskimääräinen lämpötila
$T_a$	Aurinkokeräimen ympäristön lämpötila
$G$	Auringon säteilyn intensiteetti
$K_1$	Lämpöputken ominaisuuksiin liittyvä likimäärin vakio lämpöhäviökerroin 1 (W/mK)
$K_2$	Lämpöputken ominaisuuksiin liittyvä likimäärin vakio lämpöhäviökerroin 2 (W/mK)
$T_m$	Lämpöputken menoveden lämpötila (K)
$T_p$	Lämpöputken paluuveden lämpötila (K)
$T_G$	Lämpöputken ympärillä olevan maan lämpötila (K)
$\emptyset$	Lämmönsiirtimen lämmönsiirtoteho (W)
$A$	Lämmönsiirtopinta-ala lämmönsiirtimessä (m <sup>2</sup> )
$\Delta t_{ln}$	Lämmönsiirtimen logaritminen lämpötilaero

$\eta$ lämpöverkko	Lämpöverkon hyötysuhde
$\phi'_{tot}$	Lämpöverkon lämpöhäviöteho putkipituutta kohden (W/m)
$\phi'_m$	Lämpöverkon menoputken lämpöhäviöteho putkipituutta kohden
$\phi'_p$	Lämpöverkon paluuputken lämpöhäviöteho putkipituutta kohden
$R_g$	Maan lämpövastus (W/m)
$R_i$	Putken eristeen lämpövastus (W/m)
$R_m$	Lämpöputken meno- ja paluulinjan keskinäisen vaikutuksen lämpövastus (W/m)
$\lambda_g$	Maan lämmönjohtavuus (W/m°C)
$\lambda_i$	Putken eristeen lämmönjohtavuus (W/m°C)
$H$	Putken laskennallinen sijaintisyvyys (m)
$H'$	Putken todellinen sijaintisyvyys (m)
$D_c$	Putken ulkohalkaisija (m)
$D_i$	Putken eristeen ulkohalkaisija (m)
$I$	Maanpinnan lämmönsiirtokerroin
$E$	Meno- ja paluuputken etäisyys toisistaan
$\Delta p$	Virtaavan nesteen painehäviö putkessa
$\Delta p_v$	Putken seinämän ja virtaavan nesteen välisen kitkan painehäviö
$\Delta p_K$	Putken kertavastusten aiheuttama kitkapainehäviö
$\xi$	Kitkakerroin
$\sum \zeta$	Kertavastusten kitkakerrointen summa
$L$	Putken pituus
$d_s$	Putken sisähalkaisija
$\rho$	Virtaavan nesteen tiheys
$r$	Pearsonin korrelaatiokerroin
$n$	Datapisteiden määrä
$k$	Datapisteiden indeksi
$x_k$	Muuttujan x k.:s arvo
$y_k$	Muuttujan y k.:s arvo
$\bar{x}$	Muuttujan x keskiarvo
$\bar{y}$	Muuttujan y keskiarvo
$s_x$	Muuttujan x keskihajonta
$s_y$	Muuttujan y keskihajonta



## Käytetyt lyhenteet

4GDH	Tanskalainen tutkimushanke ja käsite, 4. sukupolven kaukolämpö. Keskeistä sille on matalalämpötilainen verkko ja hajautettujen lämmönlähteiden laaja hyödyntäminen sekä uusiutuvaan energiaan perustuvan energiajärjestelmän tukeminen. [1]
AFC	Alkaalipolttokenno
<i>CHP-laitos</i>	Yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon laitos (Combined Heat and Power plant)
<i>COP</i>	Tehokerroin, joka kuvaa lämpöpumpun tehokkuutta. Saadun lämmön suhde tehtyyn sähkötyöhön.
<i>EPBD</i>	EU:n direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta ( <i>Energy Performance of Buildings Directive</i> )
FinZEB	Hanke, jossa valmistellaan esitystä siitä, kuinka määritellään Suomessa lähes nollaenergiarakennukset.
MCFC	Sulakarbonaattipolttokenno
nZEB-rakennus	Lähes nollaenergiarakennus, rakennus joka kuluttaa hyvin vähän energiaa ja jonka kuluttamasta energiasta hyvin suuri osa on tuotettu uusiutuvalla energialla, mukaan lukien paikallinen uusiutuva energia.
ORC-prosessi	Organic Rankine Cycle –prosessi on höyryturbiiniprosessi, jossa kiertoineena on veden sijasta jokin orgaaninen yhdiste, jonka höyrystymispiste on alempana kuin veden höyrystymispiste. Tällöin käytetyn lämmönlähteen lämpötila voi olla matalampi.
PAFC	Fosforihappopolttokenno
PEMFC	Polymeeripolttokenno, polymeeri on kennon elektrolyytinä
SOFC	Kiinteäaaksidipolttokenno
SPFC	Seasonal Performance Factor, maalämpöjärjestelmän koko vuoden aikaista tehokkuutta kuvava luku

# 1 Johdanto

Perinteisesti lämpöverkkoa käytetään keskitettyjen suurten lämmöntuotantolaitosten lämmönjakeluun lämmönkuluttajille. Tällöin puhutaan kaukolämmöstä. Hajautettua lämmöntuotantoa, (tässä työssä alle 20 MW) hyödynnetään täydentämään järjestelmää, esimerkiksi käytetään pienempiä vara- ja huippulämpölaitoksia. [2]

Hajautettu lämmöntuotanto ja kaukolämpöliiketoiminta voidaankin helposti nähdä vaihtoehtoisina tapoina tuottaa lämpöä. Kuitenkin hajautettu lämmöntuotanto voi toimia osana kaukolämpöjärjestelmää. Tällöin voidaan hyödyntää kaukolämpöverkon ja hajautetun lämmöntuotannon mahdollisia synergiaetuja.

Tyypilliset hajautetut lämmöntuotantomuodot, kuten aurinkolämpö, maalämpö ja hukkalämpö voivat olla vähäpäästöisiä. Pienen kokoluokan lämpökeskukset ja sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset taas voivat hyödyntää paikallisia polttoaineita. Hajautettu lämmöntuotanto tuo lisää primäärienergiavaihtoehtoja ja siten joustavuutta lämmöntuotantoon ja voi vähentää lämmöntuotannon päästöjä.

Tässä työssä tutkitaan, voiko lämpöverkko tukea hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämistä, ja mitkä tällöin ovat lämpöverkon keskeisimpiä ominaisuuksia. Seuraavaksi hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämisen taustaa ja siten tämän tutkimuksen taustaa esitellään tarkemmin.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

### 1.1.1 EU:n ja Suomen ilmastotavoitteet

Energiankulutus aiheuttaa merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä, jotka kiihdyttävät ilmastonmuutosta. Näistä hiilidioksidi on hyvin merkittävä ja vastaa vaikuttavuudeltaan n. 65 % kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen vaikuttavuudesta, sillä sitä syntyy paljon ja se säilyy kauan ilmakehässä [3]. Energiankulutuksen polttoaineiden käytön hiilidioksidikaasupäästöt olivat Suomessa vuonna 2013 yhteensä 47 miljoonaa tonnia [4].

Rakennusten lämmitys vastaa n. 25 % koko Suomen energian kulutuksesta [5]. Tämä ei kuitenkaan suoraan tarkoita, että rakennusten lämmitys aiheuttaisi 25 % kaikista hiilidioksidipäästöistä, mutta rakennusten lämmitys on kiistatta merkittävä päästöjen aiheuttaja

EU onkin sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään vuoteen 2020 mennessä 20 prosenttia vuoden 1990 tasoon verrattuna. Tavoite on kaikkia jäsenmaita sitova. Suomen maakohtainen tavoite on 16 % vähennys vuoden 1990 tasoon verrattuna. [6]

EU on sitoutunut tavoitteen saavuttamiseksi lisäämään uusiutuvien energiamuotojen osuuden 20 %:iin kaikesta energiankulutuksesta ja Suomen maakohtainen tavoite on 38 % osuus. [6] Tavoitteen saavuttamiseksi sekä sähkön että lämmöntuotannossa on hyödynnettävä entistä enemmän uusiutuvia energianlähteitä.

Energiatehokkuustavoite on EU:n tasolla 20 % vähennys energiankulutukseen, mikä vastaa 4280 TWh, mutta maakohtaisten tavoitteiden yhteenlaskettu määrä on vain 2406 TWh. Suomen osuus tästä kulutuksen vähennyksestä on 49,0 TWh. [6]

EU:n parlamentin ja Eurooppa-neuvoston julkaiseman energiatehokkuusdirektiivin (2010/31/EU on the energy performance of buildings myöhemmin EPBD) mukaan kaikkien EU:n jäsenvaltioiden uudisrakennusten on oltava vuoden 2021 alusta alkaen lähes nettonollaenergiarakennuksia ja että vuoden 2019 alusta lähtien kaikkien viranomaisten ja julkisen vallan (public authority) omistamien tai käyttämien uudisrakennusten tulee olla lähes nettonollaenergiarakennuksia.

Lähes nettonollaenergiarakennus tarkoittaa rakennusta, joka kuluttaa hyvin vähän energiaa ja kulutettu energia tuotetaan hyvin suurelta osin uusiutuvan, mukaan lukien paikallisen uusiutuvan energian avulla. [7]

Kansallisella tasolla lähes nettonollaenergiatalon määrittelyä valmistelee FinZEB -työryhmä. Työryhmän julkaisemien johtopäätösten perusteella lähes nettonollaenergiatalot tarkoittavat Suomessa hyvän energiatehokkuutta kuvaavan E-luvun omaavia taloja. Nämä talot voivat myös parantaa E-lukuaan tuottamalla osan käyttämästään lämmöstä ja sähköstä rakennuskohtaisesti hajautetun tuotannon avulla ja syöttämällä ylijäämän verkkoon. [8]

### **1.1.2 Energiaomavaraisuustavoite**

Tämän työn soveltavassa osiossa tarkastellaan Otaniemen lämpöverkkoa ja Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n omistamia kiinteistöjä Otaniemessä. Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n (myöhemmin Kiinteistöyhtiö) tavoite on, että Otaniemi on energiaomavarainen vuoteen 2030 mennessä. Energiaomavaraisuudella tarkoitetaan tässä työssä sitä, että paikallisesti tuotettu energiamäärä vastaa vuoden aikana kulutetun energian määrää, mutta polttoaineen eli primäärienergianlähteen ei tarvitse olla paikallista.

Energiaomavaraisuustavoitteen saavuttamiseksi on lisättävä hajautettua paikallista lämmön ja sähkön tuotantoa. Lisäksi rakennusten lämmön ja sähkön kulutusta on pienennettävä merkittävästi.

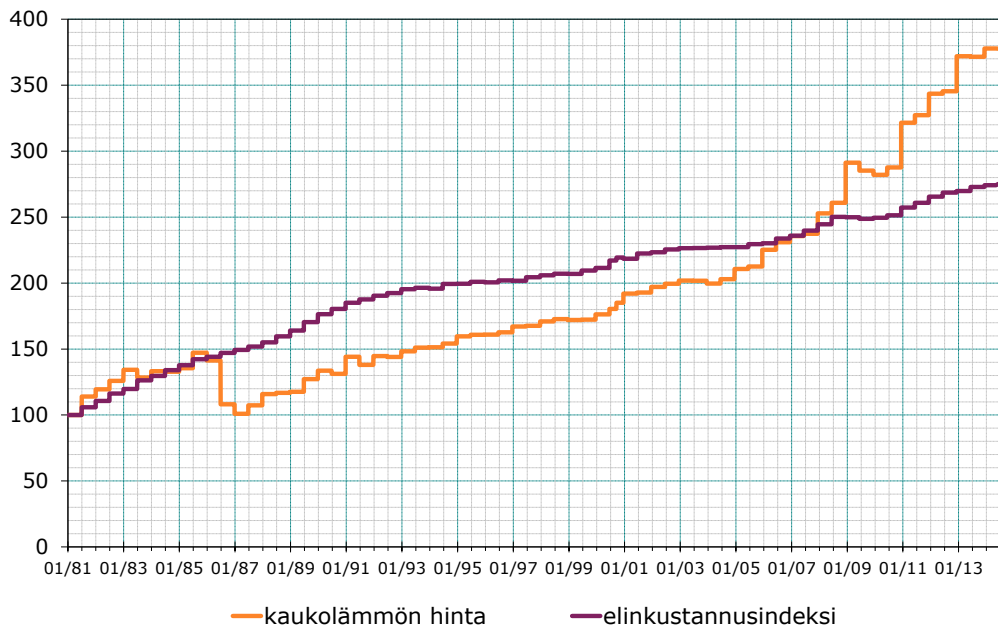
Kun paikallista hajautettua lämmöntuotantoa tarkastellaan alueellisella tasolla rakennuskohtaisen tason sijaan, saadaan hyödynnettyä paikalliset synergiat lämpö- ja jäähdytystarpeessa. Tämä tarkoittaa, että lämpöverkon rooliin on kiinnitettävä huomiota energiaomavaraisuustavoitteen saavuttamiseksi lämmön osalta.

Kiinteistöyhtiön energiaomavaraisuustavoitteen taustalla on useita tekijöitä. Kiinteistöyhtiö haluaa olla mukana luomassa Otaniemestä innovatiivista edistyskellistä ja vetovoimaista aluetta [9] ja minimoida alueen päästöjä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi [10].

Rakennusmääräykset ja EU:n energiatehokkuusdirektiivin energiatehokkuusvaatimukset velvoittavat kiinteistöyhtiötä ja energiatehokkuusvaatimusten odotetaan kiristyvän tulevaisuudessa. Tällöin paikallisen energiantuotannon ja energiatehokkuuden rooli tulee korostumaan.

Energiaomavaraisuustavoitteen taustalla on ilmastokysymysten ja kiristyvien energiatehokkuussäädösten lisäksi tarve varmistaa energianhankinnan kustannustehokkuus myös pitkällä aikavälillä [10]. Kiinteistöyhtiön sähkö- ja lämmityskulut olivat vuonna 2013 ylläpitokulujen suurimmat yksittäiset erät, lämpö 3 M€ vuodessa ja sähkö 2,9 M€ vuodessa. Vaikka Kiinteistöyhtiön lämmön kulutus tippui vuonna 2013 leudon talven vuoksi 7,5%, lämmityskulut pysyivät samoina.

Kiinteistöyhtiön kaikki talot on liitetty kaukolämpöverkkoon. Kaukolämmön hankinnan ei voida odottaa edullistuvan tulevaisuudessa. Kaukolämmön keskihinnan kasvu on ollut viime vuosina nopeampaa, kuin elinkustannusindeksin kasvu, kuten kuvasta 2 nähdään.

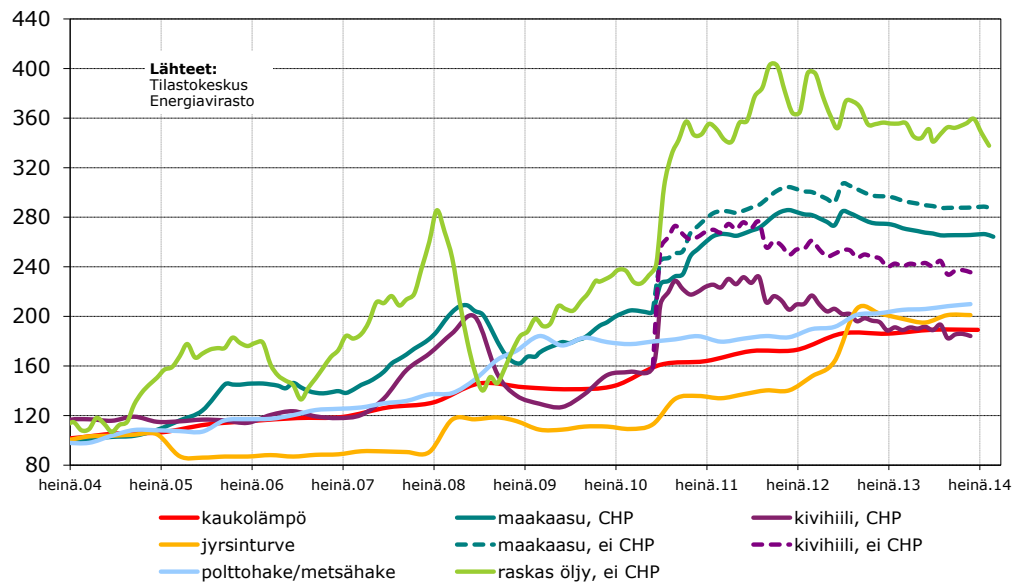


Kuva 2. Kaukolämmön keskihinta ja elinkustannusindeksi Suomessa vuosina 1981-2013. [11]

Kiinteistöyhtiö hankkii kaukolämmön Fortumilta. Kaukolämpö tuotetaan pääosin maakaasua käyttävällä Suomenojan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksella [12] ja lisäksi kivihiiltä ja raskaasta polttoöljyä käytetään huippulämpölaitoksilla. [13] Kaukolämmön hintaan vaikuttavat siis kivihiilen, maakaasun ja raskaan polttoöljyn polttoainekulut.

Kivihiilen, maakaasun, polttoöljyn ja muiden kaukolämmön tuotannossa käytettävien polttoaineiden keskihinnan kehitystä on koottu kuvaan 3. Kuvassa 2 nähdään huomattava piikki myös kivihiilen ja maakaasun hinnassa 2010 vuoden loppupuolella. Piikki selittyy polttoaineiden valmisteveron nostolla vuoden 2011 alussa ja

hiilidioksidiveron lisäyksenä vuoden 2011 alussa. Kivihiilen valmistevero nousi n. 50 eurosta tonnia kohden 126,9 euroon/tonni ja maakaasun valmistevero nousi yli nelinkertaiseksi reilusta 2 sentistä normikuutiometriä kohden tasolle 8,94 snt/nm<sup>3</sup>.



Kuva 3. Kaukolämmön tuotannossa käytettyjen polttoaineiden hintojen kehitys.7/2004 – 7/2014. [11]

Verojen lisäksi erityisesti maakaasun hintaan tulevaisuudessa saattavat vaikuttaa Venäjän ja EU:n väliset talouspakotteet. Lähes kaikki maakaasu tuodaan Suomeen Venäjältä. Maassa olevia putkia pitkin maakaasu tuodaan Venäjältä, maakaasuverkko Suomessa on esitetty kuvassa 4. Lisäksi Suomessa valmistetaan biokaasua, jolla voidaan korvata osa ulkomailta ostetusta maakaasusta. Useita nesteytetyn maakaasun tuontiterminaleja suunnitellaan myös Suomen rannikolle [14].



Kuva 4. Maakaasuverkko Suomessa vuonna 2005. Lähde: [15]

Kiinteistöyhtiö haluaa lisätä lämmöntuotannon riippumattomuutta yhdestä monopolitoimijasta, sillä kaukolämmön hinnoitteluun liittyy käytettyjen polttoaineiden hintariskin lisäksi myös monopoliriski. Kaukolämpö on Suomessa monopolitoimintaa, jota valvoo kilpailuviranomainen. Kaukolämpöyhtiö ei saa käyttää määräävää markkina-asemaansa väärin käyttämällä kohtuutonta hinnoittelua.

Kilpailu- ja kuluttajavirasto tutki hinnoittelun kohtuullisuutta kaukolämpöalalla Suomessa vuosina 2008-2012 ja totesi: ”Tutkimusten kohteina olleiden kaukolämpöyhtiöiden keskimääräinen hintataso osoittautui kyllä liiketoiminnan kannattavuus ja toiminnan riskitaso huomioiden korkeaksi, mutta kilpailusäännösten edellyttämä puuttumiskynnys ei kuitenkaan ylittynyt.” [16]

### 1.1.3 Hajautetun lämmöntuotannon merkitys tavoitteiden kannalta

Hajautetulla lämmöntuotannolle tyypillistä on paikallisuus ja pieni kokoluokka. Yleisimpiä lämmöntuotantomuotoja ovat lämpökeskukset, pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset, maalämpö ja aurinkolämpö sekä hukkalämmön lähteiden hyväksikäyttö. [17, 18]

Tyypillisten tuotantomuotojen ansiosta hajautetulla lämmöntuotannolla on rooli sekä ilmasto- että energiaomavaraisuustavoitteiden kannalta. Hajautettu lämmöntuotanto on usein uusiutuvilla energianlähteillä tuotettua, jolloin se voi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Kokoluokan ja paikallisuuden ansiosta hajautettu lämmöntuotanto myös mahdollistaa rakennus- tai aluekohtaisen energiaomavaraisuuden lämmön suhteen. Energiaomavaraisuudessa pelkkä energiatehokkuus ei riitä, sillä lämmitystarvetta ja lämpimän käyttöveden tarvetta ei todennäköisesti pystytä tuottamaan pelkän passiivin aurinkolämmön ja ilmaisenergioiden avulla. Tällöin energiaomavaraisuuden turvaamiseksi täytyy hyödyntää hajautettua lämmöntuotantoa.

Kiinteistöyhtiö on jo teettänyt selvityksen hajautettuun lämmöntuotantoon soveltuvista teknologioista ja niiden potentiaalisuudesta Otaniemeen. Lämpöverkon merkityksestä hajautettujen lämmöntuotantomuotojen kannalta halutaan kuitenkin lisätietoa.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tässä työssä tavoitteena on selvittää mikä lämpöverkon merkitys on hajautettua lämmöntuotantoa hyödyntävässä järjestelmässä ja mitkä sen keskeiset ominaisuudet ovat hajautetun lämmöntuotannon kannalta. Tutkitaan siis, voiko lämpöverkko tai kaukolämpöjärjestelmä täydentää ja tukea hajautettua lämmöntuotantoa hyödyntävää energijärjestelmää.

Tavoitteen saavuttaminen edistää omalta osaltaan hajautettujen energianlähteiden hyödyntämistä lämmöntuotannossa ja lisää ymmärrystä lämpöverkon merkityksestä hajautetulle lämmöntuotannolle. Työn tavoitteena on tuoda esiin synergiaetuja lämpöverkon ja hajautetun lämmöntuotannon välillä. Täten työ edistää myös hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämistä entistä laajemmin nykyisessä kaukolämpöverkossa.

Työ tukee Aalto-yliopistokiinteistöjen energiaomavaraisuustavoitetta antamalla tietoa lämpöverkon merkityksestä paikallisen lämmöntuotannon ja Otaniemen lämmönkuluttajien kannalta

Tutkimustavoitetta voidaan jäsentää tutkimuskysymysten avulla. Päättökysymys on: **Mikä on lämpöverkon merkitys hajautettua lämmöntuotantoa hyödyntävässä järjestelmässä?**

Päättökysymykselle alisteisia tutkimuskysymyksiä ovat:

- **Hajautettu lämmöntuotanto:** Mitkä lämpöverkon ominaisuuksista ovat merkittävimpiä hajautetun lämmöntuotannon kannalta? Kuinka lämmöntuotanto kytketään verkkoon? Mitkä lämpötilat ovat sopivimpia eri lämmöntuotantomuodoille?
- **Rakennukset:** Kuinka rakennukset liitetään yleisesti verkkoon ja kuinka kannattaa liittää hajautetun energiantuotannon kohdalla?
- **Energiaomavaraisuustavoitteet:** Mikä merkitys lämpöverkolla on energiaomavaraisuustavoitteiden kannalta?
- **Otaniemeen sovellettavia kysymyksiä:** Kuinka lämpöverkko voi edistää Otaniemessä erityisen potentiaalisen maalämpöinvestoinnin käyttöä?

### 1.3 Tutkimusaineisto ja menetelmät

Teoreettisessa osiossa tutkimusaineistona käytetään alan kirjallisuuslähteitä. Näitä ovat käsikirjat, tieteelliset artikkelit ja alan yritysten, konsulttien, kaupunkien, yhdyskuntien ja muiden toimijoiden aiheeseen liittyvät aineistot, kuten internet-sivut ja raportit. Lisäksi

alueen kaukolämpötoimijaa on haastateltu avoimeen kaukolämpöverkkoon liittyen.

Työn tavoitteen saavuttamiseksi tutkitaan ensin kirjallisuusselvityksen avulla hajautetun lämmöntuotannon muotoja, jotta saadaan selville niiden keskeisimmät ominaispiirteet lämmönsiirron kannalta. Seuraavaksi tutkitaan hajautettuun tuotantoon perustuvan järjestelmän lämmön kulutuksen ja tuotannon tasaustarvetta. Lopuksi kirjallisuuden avulla tutkitaan itse lämpöverkkoa ja tutkimusta, joka liittyy hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämiseen verkossa.

Tämän tutkimuksen perusteella päätellään, mikä merkitys lämpöverkolla on kokonaisuudessa ja mitkä ovat lämpöverkon keskeisimmät ominaisuudet. Tätä päätelmää täydennetään soveltaen Otaniemeen.

Lämpöverkon keskeisiä ominaisuuksia ja merkitystä hajautetussa lämmöntuotannossa tutkitaan kirjallisuuden lisäksi soveltavien laskelmien avulla. Soveltavat laskelmat tehdään Otaniemen alueella olevaan lämpöverkkoon ja kiinteistöyhtiö Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n omistamiin rakennuksiin liittyen.

Lämpöverkon lämpötilatason vaikutusta lämpöverkon lämpöhäviöihin Otaniemen alueella tutkitaan yksinkertaistetun keskimääräisiin lämpötiloihin perustuvan laskentatavan avulla. Lämpöverkon merkitystä maalämpöön perustuvassa järjestelmässä tutkitaan esimerkkivuoden 2012 kulutuksia ja oletetun maalämpöjärjestelmän simuloitua tuottoa analysoimalla.

### 1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tässä työssä hajautettu lämmöntuotanto rajataan tarkoittamaan paikallista energiantuotantoa kokoluokassa alle 20 MW. Tällaisia hajautettuja lämmöntuotantomuotoja ovat polttoaineen polttamiseen perustuvat lämpölaitokset, pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset eli pien-CHP-laitokset, aurinkokeräimet, maalämpöjärjestelmät ja erilaiset hukkalämmön lähteet. Työn rajaukseen sisältyvät sekä rakennuskohtaiset että paikalliset lämmönlähteet.

Työssä keskitytään tutkimaan hajautettua lämmöntuotantoa rakennusten lämmitystarpeisiin. Hajautettu lämmöntuotto ensisijaisesti teollisuuden prosessien käyttöön rajataan tarkastelun ulkopuolelle.

Lämpöä voidaan siirtää joko väliaineeseen eli kaasuun tai veteen sitoutuneen tuntuvan lämmön avulla, varastoituna faasimuutosmateriaaliin tai termokemialliseen materiaaliin tai säteilylämpönä. Kuitenkin yleisin tapa siirtää lämpöä rakennusten käyttöön on siirtää lämpö veteen tai ilmaan sitoutuneena tuntuvana lämpönä putkistoa pitkin. [19]



Tässä työssä lämmön siirtoa tarkastellaan veteen sitoutuneena tuntuvana lämpönä. Tämä mahdollistaa keskittymisen hajautettua lämmöntuotantoa tukevan lämpöverkon ominaisuuksien analysointiin. Lämmön siirtäminen vedellä on valittu tarkastelukohteeksi myös siitä syystä että siitä on olemassa paras tietotaito, teknologia tunnetaan hyvin ja se on laajasti käytössä. Lisäksi nykyinen lämmönsiirtoinfrastruktuuri tutkitulla alueella Otaniemessä perustuu lämmön siirtoon veden avulla.

Tutkimus rajautuu täyttämään sille asetetut tavoitteet. Tutkimuskohteena käytetään Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n omistamia Otaniemessä sijaitsevia opetus- tutkimus- ja toimistokäytössä olevia rakennuksia ja Otaniemen alueen lämpöverkkoa.

Tutkimuksessa tehdyt soveltavat laskelmat ja analyysit perustuvat mitattuun toteutuneeseen kulutustietoon ja laskelmia varten tehtyjen oletusten mukaisiin lämmöntuotantotietoihin.

## 2 Hajautettu lämmöntuotanto

Hajautetulla lämmöntuotannolla tarkoitetaan tässä työssä paikallisia lämmöntuotantotapoja. Hajautettu lämmöntuotanto sanana viittaa myös eroavaisuuteen keskitetystä lämmöntuotannosta. Kuitenkin hajautetulla lämmöntuotannolla ei tarkoiteta vain yksittäisten talojen erillistä lämmitystä, vaan myös alueellisia lämmitysratkaisuja. Hajautetulla lämmön tuotannolla tarkoitetaan tässä työssä sellaista paikallista lämmöntuotantoa, jossa yksittäisen yksikön tehontuotto on alle 20 MW.

Kansallisella tasolla paikallisen energiantuotannon ratkaisuja pohditaan liittyen energiatehokkuusdirektiiviin (EPBD) ja sen soveltamiseen Suomeen. Kansallisen, alan toimijoista muodostetun konsortion tuottaman Energiantuotantoketjut -aineistot selvityksen perusteella potentiaalisimpia alueellisia lämmöntuotantomuotoja Suomessa ovat aurinkolämpö, maalämpö, biomassan poltto ja sähkön ja lämmön yhteistuotanto eli CHP-laitokset. [20]

Otaniemen tasolla energiantuotantomuotoja on selvitetty Aalto-yliopistokiinteistöjen energiaomavaraisuustavoitetta varten. Gaia Consultingin selvityksen mukaan lämmöntuotantomuodoista potentiaalisimpia ovat aurinkolämpö, maalämpöpumput, ilma-vesi- ja ilma-ilma-lämpöpumput ja pien-CHP. Myös polttokennojärjestelmä, joka tuottaisi lämpöä ja sähköä olisi mahdollinen. Lisäksi lämmönvarastoinnin ja lämpöverkon avulla voidaan hyödyntää myös kesällä rakennuksissa syntyvää hukkalämpöä ja teollisuuden hukkalämmön lähteitä. Erityyppisiä teollisen hukkalämmön tarjoajia on, näistä kerrotaan tarkemmin luvussa 2.5.2.

Tämän luvun alaluvuissa on kerrottu tarkemmin Otaniemeen soveltuvista lämmöntuotantomuodoista.

### 2.1 Pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotanto ja lämpökeskukset

Pienimuotoiseen sähkön ja lämmön yhteistuotantoon voidaan käyttää monia erilaisia teknologioita. Niitä ovat esimerkiksi ORC-prosessiin (Organic Rankine Cycle) perustuva tuotanto, polttomoottorit, kaasutusprosessiin perustuva tuotanto, Stirling-moottorit, höyryturbiinit, höyrykoneet, mikroturbiinit, polttokennot [21] ja yhdistetyt aurinkopaneeli-keräimet.

Lämpökeskuksissa taas tuotetaan ainoastaan lämpöä. Lämpökeskuksissa lämmön tuotto perustuu polttoaineen palamiseen. Lämpökeskustyyppejä ovat kiinteät kattilalaitokset, siirrettävät kattilalaitokset ja kiinteän polttoaineen kattilat. [22]

#### 2.1.1 Höyrykone ja -turbiini

Höyryturbiinissa ja höyrykoneessa polttoainetta poltetaan palokammiossa ja prosessissa vapautuva lämpö höyrystää työaineena käytettyä vettä. Kovassa paineessa oleva vesihöyry paisuu höyryturbiinissa ja pyörittää turbiinin siipiä ja turbiinilta pyörimisliike välitetään generaattorille. Generaattorissa mekaaninen energia muuttetaan sähköenergiaksi. [21] Sähkön tuotannossa höyryturbiineilla jäädään pienen

kokoluokan, eli alle 1 MWe laitoksilla 15-35 % hyötysuhteeseen. Suuren kokoluokan tuotannossa sähkön tuotannon hyötysuhde voi olla jopa 40 %.

Höyrykoneessa paisuva höyry taas liikuttaa mäntää, jonka liike muutetaan kampiakselin avulla pyörimisliikkeeksi ja pyörimisliike välitetään generaattorille. Höyrykoneita käytetään useimmiten alle 1 MW laitoksissa, koska niillä on tässä kokoluokassa parempi hyötysuhde kuin höyryturbiinilla. [21]

### **2.1.2 ORC-prosessi**

Organic Rankine Cycle (ORC) -prosessiin perustuva sähkön ja lämmön tuotto soveltuu erityisen hyvin pienen kokoluokan tuotantolaitoksiin. Organic Rankine Cycle eroaa perinteisestä höyryturbiiniprosessista siten, että kiertoaine on veden sijasta jokin orgaaninen yhdiste, jonka höyrystymispiste on matalampi kuin vedellä. [21] Tällöin kiertoaineen höyrystämiseen käytetyn lämmönlähteen lämpötila voi olla matalampi. [23]

Matalamman lämpötilan lämmönlähteiden käyttömahdollisuus on ORC-prosessin etu, joka mahdollistaa esimerkiksi keskitetyn aurinkolämmön, teollisuuden hukkalämmön tai biopolttoaineen poltossa syntyvän lämmön hyödyntämisen. Tyypillisesti ORC-prosessilla päästään sähköntuotannossa 15-20 % hyötysuhteeseen ja lämpöä saadaan 60-70 % hyötysuhteella. Lisäksi ORC-prosessin vahvuuksia ovat tekniikan yksinkertaisuus, mahdollisuus automatisointiin ja vähäinen ylläpidon tarve. Lisäksi kuorman pienentäminen täydestä kuormasta osakuormalle ei heikennä hyötysuhdetta yhtä voimakkaasti, kuin höyryprosessien kohdalla. [23]

### **2.1.3 Mikroturbiinit**

Mikroturbiinit voivat käyttää polttoaineenaan biomassaa, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Mikroturbiinit ovat pienen kokoluokan kaasuturbiineita [21], joissa polttoainetta poltetaan palamiskammiossa. Palamisilma paineistetaan eli ahdetaan ennen palamiskammioon ohjaamista. Palamiskammioista kuuma kaasu johdetaan suoraan turbiiniin, jossa paisuva kaasu aiheuttaa turbiinin pyörimisliikkeen ja pyörimisliikkeen mekaaninen energia muutetaan generaattorissa sähköenergiaksi. Turbiinista ulos tulevan kaasun lämpötila on tyypillisesti 450-550 °C, joten sen avulla voidaan vielä tuottaa höyryä, jota vuorostaan voidaan käyttää höyryturbiinissa.

Mikroturbiineiksi lasketaan kokoluokkaa 25-250 kW olevat kaasuturbiinit ja niiden hyötysuhde riippuu voimakkaasti turbiinin tehosta ja kuormituksesta. Mikroturbiinin sähkön tuoton hyötysuhde on huonompi, kuin suuremman turbiinin; sähköhyötysuhde voi jäädä alle 25 %, kun se yli 3 MW turbiinilla voi ylittää 30 %. Lämmön-tuottohyötysuhde on 50-60 %. Mikroturbiineista saatavan lämmön lämpötilataso on 85-100 °C ja lisäksi turbiinilta tulevaa 450-550 asteista kaasua voidaan käyttää höyryn tuottamiseen.

### 2.1.4 Stirling -moottorit

Stirling -moottorissa kaasun lämpötilan muutoksen aiheuttama tilavuuden muutos muutetaan sylintereiden ja kampaakseleiden avulla pyörimisliikkeeksi ja pyörimisliikkeen liike-energia muutetaan generaattorissa sähköenergiaksi. Stirling -moottorin erottaa muista kaasun paisumiseen perustuvista koneista regeneraattori, eli koneen viileän puolen ja kuuman puolen välillä oleva lämmönvaihdin, joka parantaa koneen energiatehokkuutta. Kaasun lämmitys ja viilennys tehdään ulkoisen lämmönlähteen avulla lämmönvaihtimien välityksellä. [21]

Mahdollisuus käyttää ulkoista lämmönlähdettä mahdollistaa monipuolisesti erilaisen polttoaineiden ja lämmönlähteiden, kuten keskitetyn aurinkolämmön, erilaisten biomassojen polton tai teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisen. Ulkoisen lämmönlähteen lämpötilatason on kuitenkin oltava melko korkea, luokkaa 700-750 °C. Stirling -moottorista saatavan lämmön lämpötilataso on n. 60-85 °C. Stirling -moottorin muita etuja hajautetussa energian tuotannossa ovat verrattain pieni huollon tarve, hyvä skaalautuvuus pieniin sovelluksiin, ja kokoluokassaan verrattain hyvä hyötysuhde. [18]

### 2.1.5 Polttomoottorit

Moottorivoimalassa tuotetaan mekaanista työtä mäntämoottorin avulla ja mäntämoottorin tuottama mekaaninen työ muutetaan generaattorin avulla sähköksi. Moottorivoimala käyttää polttoaineenaan kaasua tai nestemäistä polttoainetta, yleensä dieselöljyä. Moottorivoimalan sähköntuotantoprosessissa syntyy myös hukkalämpöä, joka voidaan hyödyntää. Tämän hukkalämmön lämpötilataso on 85-100 astetta ja lisäksi voidaan tuottaa matalapaineista höyryä tai jos vesi paineistetaan voidaan tuottaa 100 astetta kuumempaa vettä.

Hyötysuhde moottorivoimaloissa hyötysuhde on verrattain korkea ja se riippuu voimalan koosta. Hajautetun tuotannon kokoluokassa sähköntuottohyötysuhde voi vaihdella 30-45 % välillä: pienimmissä alle 200 kW:n voimaloissa hyötysuhde on lähempänä 30 %, kun taas yli 2 MW:n voimalaloissa sähköntuottohyötysuhde voi olla 45%. Kokonaishyötysuhde vaihtelee vastaavasti 75-90 % välillä.

### 2.1.6 Polttokennot

Polttokennossa polttoaineen kemiallinen energia muutetaan suoraan sähköksi kemiallisen reaktion avulla. Polttokennon polttoaine on vety, mutta vetyä voidaan tuottaa reformoimalla myös muusta polttoaineesta joko kennon sisäisessä järjestelmässä tai polttokennon ulkopuolella. Polttokennossa on kaksi elektrodia, anodi ja katodi, jotka ovat yhteisessä elektrolyytissä. Anodille syötetään vetyä ja vety luovuttaa elektroneja. Elektronit kulkevat ulkoisen virtapiirin kautta katodille ja muodostavat polttokennon tuottaman sähkövirran. Positiivisesti varautuneet vetyionit kulkeutuvat elektrolyytin kautta katodille, jossa ne hapettuvat vedeksi. [18]

Polttokennoista saadun lämmön lämpötilataso riippuu polttokennotyypistä. Matalan lämpötilan polttokennoja ovat alkaalipolttokenno (AFC), polymeeripolttokenno (PEMFC), fosforihappopolttokenno (PAFC) ja ne toimivat 60-200 asteen lämpötiloissa. Korkean lämpötilan polttokennoja ovat sulakarbonaattipolttokenno (MCFC),

joka toimii 500-600 asteen ja kiinteäoksidi-polttokenno (SOFC), joka toimii 800-1000 asteen lämpötilassa.

Polttokennoja kehitetään hyvin laajalla tehoskaalalla 1kW:sta 50 MW:iin. Polttokennot voivat toimia osatehoillakin hyvällä hyötysuhteella, mikä parantaa niiden säädettävyyttä. Matalan lämpötilan polttokennojen sähkön tuoton hyötysuhde on yleensä n. 40 % ja korkean lämpötilan polttokennojen sähköhyötysuhde on jopa 50 %. Kokonaishyötysuhteet ovat vastaavasti 70-95 %.

### **2.1.7 Pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannon hyödyntäminen**

Kaiken kaikkiaan pienen kokoluokan CHP-laitoksia voidaan hyödyntää hajautettuun lämmöntuotantoon. Mikroturbiinit, höyrykoneet, ORC-koneet, biomassan kaasutukseen perustuvat tekniikat ja Stirling -moottorit ovat jo kaupallisessa käytössä.

Pien-CHP -laitosten keskeisiä ominaisuuksia on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Pien-CHP teknologioiden yhteenveto.

	ORC	Polttomoottori	Stirlingmoottori	Höyrykone	Höyryturbiini	Mikroturbiini	Polttokenno
Tyypillinen kokoluokka	> 200 kWe	< 10 MWe	0,5-25 kWe	100 - 1000 kWe	>1000 kWe	25-250	0,5-2000 kWe
Sähkö-hyötysuhde	15-20	<200 kWe: 30-38 % 200-2000 kWe: 35-40 % 2-10 MWe: 40-45 %	15-35 %	6-40 % riippuen laitoksen koosta	15-35 % riippuen laitoksen koosta	15-35	38-55%
Lämpö-hyötysuhde	60-70	<200 kWe: 45-50 % 200-2000 kWe: 45-50 % 2-10 MWe: 45-50 %	50-60	40-70 %	40-70 %	50-60 %	30-45 %
Kokonais-hyötysuhde		<200 kWe: 75-85 % 200-2000 kWe: 80-90 % 2-10 MWe: 85-90 %	60-80			75-85	70-95 %
Lämmön lämpötilataso		<200 kWe: 85-100 200-2000 kWe: 85-100, höyry 2-10 MWe: 85-100, höyry	60-85	>100	>100	85-100	riippuu kennon tyypistä
Käytettävät energianlähteet	biomassa, muut polttoaineet, keskitetty aurinkolämpö, teollisuuden hukkalämpö (lämpötilataso XXX)	maakaasu, puhdas biokaasu ja diesel	biomassa, muut polttoaineet, keskitetty aurinkolämpö, teollisuuden hukkalämpö, (lämpötilataso 700-750 °C)	kaikki polttoaineet poltto-tekniikasta riippuen	kaikki polttoaineet poltto-tekniikasta riippuen	biomassa, nestemäiset ja kaasumaiset polttoaineet	maakaasu, biokaasu, metanoli, vety, hiili-monoksidi
Kehitystase	Varhais-kaupallinen	Laajasti käytössä	Pilot-vaihe	Laajasti käytössä	Laajasti käytössä	Varhais-kaupallinen vaihe	Kehitysvaihe

## 2.2 Lämpökeskukset

Lämpöverkkoon kytketyissä lämpökeskuksissa polttoaineen palamisessa syntyvä lämpö siirretään verkosta riippuen joko veteen tai höyryyn. Lämpökeskuksia voidaan käyttää lämpöverkossa perus- huippu- ja varatehon lähteinä. Lämpökeskusten polttoaineena voidaan käyttää polttotekniikasta riippuen hyvin monen tyyppisiä polttoaineita: kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia. [22]

Kiinteisiin kattilalaitoksiin kuuluvat tulitorvi-tuliputkikattilat ja vesiputkikattilat. Niissä polttoaine palaa palotilassa ja savukaasut lämmittävät vettä. Tulitorvi-tuliputkikattiloissa savukaasut virtaavat putkissa ja lämmittävät vesitilaa. Vesiputkikattiloissa taas vesi virtaa putkissa ja savukaasu putkien ulkopuolella. Molemmissa polttoaineena käytetään pääosin öljyä ja kaasua. [22]

Siirrettävät kattilalaitokset voidaan nimensä mukaan siirtää tarpeen mukaan eri paikkoihin. [22] Niitä käytetäänkin useimmiten varalämpötehon lähteenä lämpöverkossa.

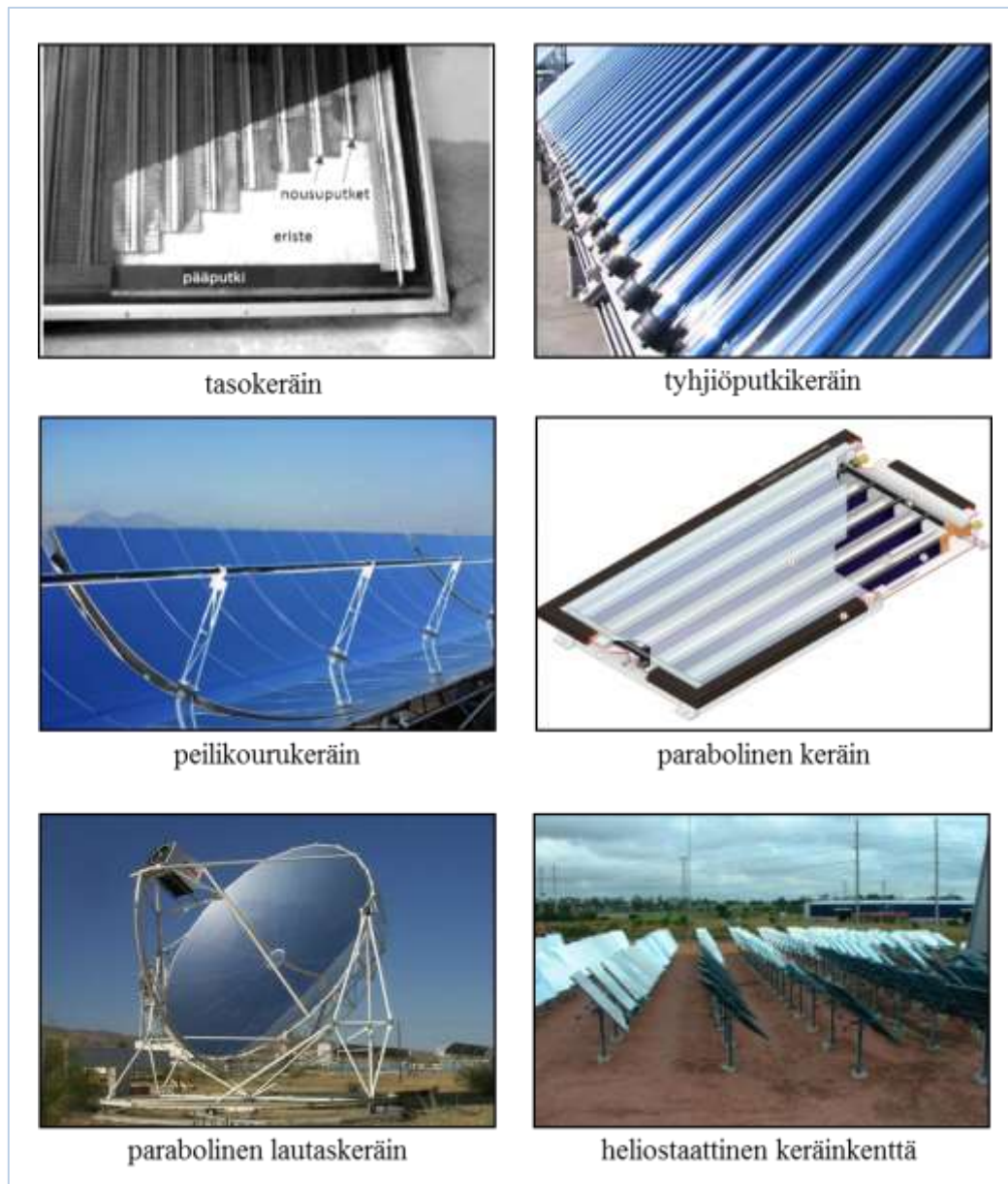
Kiinteän polttoaineen kattiloissa voidaan nimensä mukaan polttaa kiinteitä polttoaineita, kuten puuhaketta tai turvetta. Kiinteän polttoaineen kattiloihin kuuluvat ari-nakattilat ja leijupetikattilat.

Lämpökeskuksissa voidaan tuottaa kuumaa vettä, höyryä tai tulistettua höyryä. Lämmin vesi on lämpötilaltaan alle 120 asteista ja tarvittaessa voidaan valmistaa paineistettua vettä.

## 2.3 Aurinkolämpö

Aurinkolämpöä tuotetaan aurinkokeräinten avulla. Aurinkokeräimet ovat kuin lämmönsiirtimiä, joissa auringon säteilyenergia lämmittää keräimessä kiertävää väliainetta. Väliaineena käytetään useimmin vettä, vesiliuosta, ilmaa tai öljyä. Lämpö voidaan siirtää väliaineeseen sitoutuneena käyttökohteeseen tai varastoon. Lämpö useimmiten siirretään lämmönsiirtimellä väliaineesta seuraavaan käyttökohteeseen,

jolloin sama väliaine voi kiertää viilennyttyään takaisin aurinkokeräimeen. [24] Aurinkokeräintyyppjä on kerätty kuvaan 5.



*Kuva 5. Aurinkokeräintyyppjä. Lähteet: tasokeräin [24], tyhjiöputkikeräin [25], parabolinen keräin [26], peilikourukeräin [27], parabolinen lautaskeräin [28], heliostaattinen keräinkenttä [29]*

Aurinkokeräimet voidaan jakaa staattisiin ja auringon säteilyn suuntaa seuraaviin keräimiin. Staattisiin aurinkokeräimiin kuuluvat tasokeräimet, tyhjiöputkikeräimet ja paraboliset keräimet. Auringon säteilyä seuraavat keräimet voidaan edelleen jakaa 1-aksaaliseen ja 2-aksaaliseen. 1-aksaaliseen keräimiä ovat parabolinen keräin, viivamainen Fresnel -keräin, sylinterimäinen peilikourukeräin



ja parabolinen peilikourukeräin. 2-aksaaliseuraavia keräimiä ovat parabolinen lautaskeräin ja heliostaattinen keräinkenttä. [24] Tällä hetkellä yleisesti saatavilla olevia aurinkokeräintyyppjeä on koottu taulukkoon 2.

*Taulukko 2. Aurinkokeräintyyppien ominaisuuksia. Lähde: [24]*

Asennus	Keräintyyppi	Säteilyn absorboija	Keskityssuhde (keräinala/absorboijan ala)	Suuntaantava lämpötilataso
Staattinen	tasokeräin	taso	1	30-80
	tyhjiöputkikeräin	taso	1	50-200
	parabolinen keräin	putkisto	1-5	60-240
Säteilyn 1-aksaali-seuraus	parabolinen keräin	putkisto	5-15	60-300
	viivamainen Fresnel keräin	putki	10-40	60-250
	sylinterimäisen peilikourukeräin	putki	15-50	60-300
	parabolinen peilikourukeräin	putki	10-85	60-400
Säteilyn 2-aksaali-seuraus	parabolinen lautaskeräin	pistemäinen	60-2000	100-1500
	heliostaattinen keräinkenttä	pistemäinen	300-1500	150-2000

Kuten taulukosta Taulukko 2. Aurinkokeräintyyppien ominaisuuksia. Lähde: 2 nähdään, ovat keskittävien aurinkokeräimien (keskityssuhde >1) tuottamat lämpötilat korkeita, jopa useita satoja tai tuhansia asteita. Usein niitä käytetäänkin tuottamaan esimerkiksi höyryä höyryvoimalaitokseen, jossa tuotetaan sähköä.

Keskittäviä aurinkolämpökeräimiä voidaan Suomessa käyttää, mutta silloin ei saada hyödynnettyä auringon hajasäteilyä juurikaan. Keskittävä aurinkokeräin kerää vain suoraa säteilyä tehokkaasti, sillä tällöin keräinpintaan osuu vain sopivassa kulmassa tai sopivalla kulmavälillä keräimeen tuleva säteily. Siksi suurin osa keskittävistä aurinkokeräimistä hyödyntääkin joko 1-aksaaliseurausta tai 2-aksaaliseurausta. Esimerkiksi Etelä-Suomessa keskimäärin kokonaissäteilystä n. 30-60 % on hajasäteilyä, eli hyvin merkittävä määrä. [30]

Aurinkolämmön tuottamiseen käytetäänkin Suomessa useimmin staattisia tasokeräimiä ja tyhjiöputkikeräimiä. Esimerkiksi tasokeräinten keskimääräinen investointikustannus Euroopassa vuonna 2006 oli 200 €/m<sup>2</sup>. [31]

Muista pohjoismaista esimerkiksi Tanskassa kaukolämmön tuottamiseen hyödynnetään jo laajasti aurinkolämpöä. Tanskassa on sivuston solvarmedata.dk mukaan n. 40 suurta aurinkokeräinkenttää. [32] Kaiken kaikkiaan aurinkolämpökeräimiä oli vuonna 2013 asennettu arviolta 400 000 m<sup>2</sup>. [33] Näistä kentistä yhteensä n. 30 on osana kaukolämpölaitosta, joissa aurinkolämmöllä tuotetaan 15-20 % laitoksen koko energian tuotannosta ja loput 80-85 % energiasta tuotetaan CHP-laitoksissa jollakin polttoaineella. Sekä pääasiallisella polttoaineella tuotettu lämpö että aurinkolämpö on kytketty kaukolämpöverkkoon.

Esimerkiksi Brædstrupin kaukolämpökeskus sisältää maakaasulla toimivan CHP-laitoksen ja aurinkolämpökentän, joka tuottaa vuodessa 8 700 kWh lämpöä, joka vastaa noin 20 % koko laitostekonaisuuden tuottamasta energiasta. [34]

Aurinkokeräimillä olisi Otaniemessä mahdollista saavuttaa lämmön suhteen netto-omavaraisuus nykytilanteen mukaisella kulutustasolla asentamalla 60 000–150 000 m<sup>2</sup> keräimiä, riippuen käytetystä teknologiasta, aurinkolämmön hyödyntämistavasta ja lämpötilatasoista [35]. Tällöin keräinten investointikustannukset olisivat arviolta 12-30 M€ riippuen valitusta teknologiasta ja asennustavasta. Tämä investointi ei kuitenkaan sisällä varastoinnin, verkkoon liittämisen ja mahdollisten rakennuksiin tehtävien muutostöiden hintaa.

## 2.4 Maalämpö

Maalämpöä kerätään Suomessa yleisimmin joko maan pinnan alle asennetun vaakatasoisen keruuputkiston avulla tai 60-200 metriä syvien kallioon porattujen kaivojen sisällä kiertävien keruuputkien avulla. Putket ovat ikään kuin valtavia lämmönvaihtimia ja niissä kiertää vesi tai vesi-jäätymisenestoaineseos, johon siirtyy lämpöä maasta. [36] Tällaista järjestelmää kutsutaan suljetun kierron järjestelmäksi. [37]

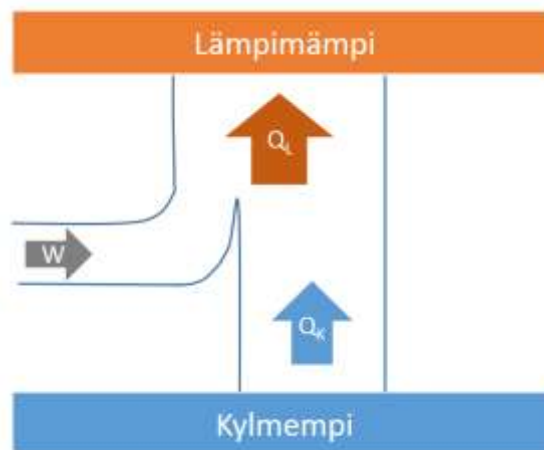
Maalämmön avulla rakennusta voidaan lämmittää tai viilentää eli maata voidaan käyttää lämmönlähteenä tai lämpönieluna. Maasta tällä tavoin hyödynnettävä lämpö sisältää maan ytimeistä tulevan geotermista lämpöä ja auringon säteilyn lämpöä, joka on absorboitunut maahan. [37] EU luokittelee maalämmön geotermiseksi lämmöksi direktiivissä uusiutuvan energian käytöstä. [38]

Maalämpöjärjestelmät on asiantuntijayritys Motiva Oy:n ohjeiden mukaan taloudellista mitoittaa kattamaan 40–60 % huipputehon tarpeesta, jolloin niillä tuotetaan 80–90 % lämmitysenergiasta vuoden aikana [36]. Tällöin huipputehontarve kateetaan esimerkiksi suoralla sähkölämmityksellä tai kaukolämmöllä.

Maasta kerätyn lämmön lämpötilataso nostetaan tarvittavalle tasolle lämpöpumpun avulla. Maalämpöjärjestelmissä lämpöpumppu voi olla joko kompressoripumppu tai absorptiolämpöpumppu. Absorptiolämpöpumpun etu kompressorilämpöpumpun on mahdollisuus käyttää ulkoista lämmönlähdettä pääenergianlähteenä. Tämä mahdollistaa esimerkiksi kesällä rakennusten jäähdyttämisen hukkalämmön avulla.

Maalämpöpumpun tehokkuutta kuvataan yleisesti COP -arvolla. COP -arvo tarkoittaa lämpöpumpun tekemän työn ja tuotetun lämmön suhdetta jossakin tietyssä toimintalämpötilassa.

Lämpöpumppu on lämpövoimakone, joten teoreettinen raja lämpöpumpun maksimaaliselle COP -arvolle saadaan Carnot'n kiertoprosessista. Lämmön siirtämiseen matalammasta lämpötilasta lämpimämpään käytetään työtä. Energiaa muuttuu muodosta toiseen. Mikäli oletetaan ideaaliprosessi, eikä oteta huomioon lämpöhäviöitä ja energian muuttumista muotoon, jossa sitä ei voida hyödyntää, muuntoprosessi vastaa kuvaa 6.



Kuva 6. Lämpöpumpun ideaaliprosessin energiavirrat,  $W$  on systeemiin tuotu työ,  $Q_K$  kylmästä systeemistä tuotu lämpömäärä ja  $Q_L$  lämpimään systeemiin viety lämpömäärä.

Tällöin ideaalitilanteessa muuntokerroin COP:lle voidaan johtaa:

$$\text{COP}_{\text{ideaali}} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_L - Q_K} = \frac{T_L}{T_L - T_K} \quad (1)$$

COP ei kuitenkaan ota huomioon lämmönlähteen tai lämpönielun vuoden aikana tapahtuvia lämpötilan muutoksia. COP mahdollistaa eri lämpöpumppujen vertailun tai yhden lämpöpumpun toiminnan vertailun eri olosuhteissa.

Maalämpöjärjestelmän toimintaa koko vuoden aikana kuvaa SPF-arvo (Seasonal Performance Factor), joka ottaa huomioon kaikkien vuodenaikojen lämpöolosuhteiden vaikutuksen maalämpöjärjestelmän tehokkuuteen. Maalämpöpumpun SPF-arvo on sitä parempi, mitä matalampaan lämpötilaan maasta kerätty lämpö nostetaan pumpun avulla lämmitystä varten ja mitä korkeamman viilennyslämpötilan avulla rakennusta viilennetään. [37]

Maalämpöjärjestelmää suunniteltaessa on syytä varmistaa, että maa, johon maalämmönvaihtimet on kytketty, pysyy riittävän lämpimänä vuoden ympäri ja koko järjestelmän elinkaaren ajan. Onkin syytä suunnitella järjestelmä siten, etteivät lämpökeräinkentät tai -kaivot pääse ehtymään eli lämpöä ei oteta maasta enemmän, kuin siihen sitoutuu auringon säteilystä ja johtuu geotermisenä lämpönä. [37]

## **2.5 Hukkalämmön hyödyntäminen**

### **2.5.1 Rakennusten hukkalämpö**

Rakennusten hukkalämmöllä tarkoitetaan rakennuksessa syntyvää tai rakennukseen siirtyvää lämpöä, jota ei voida kompensoida lämmitystä vähentämällä ja joka nostaa rakennuksen huonelämpötilaa toivotusta. Hukkalämmön lähteitä ovat erilaiset ns. ilmaisenergiat esimerkiksi auringon säteily, ihmisten tuottama lämpö, sähkölaitteiden kuten tietokoneiden tai kodinkoneiden tuottama lämpö [39]. Lisäksi mikäli rakennuskohtaista aurinkolämmön ylijäämätuotantoa ei voida hyödyntää rakennuksessa, voidaan tämä laskea rakennusten hukkalämmöksi. Tulevaisuudessa lähes energiaomavaraiset rakennukset tulevat tuottamaan kesäaikaan yhä enemmän hukkalämpöä [40].

Hukkalämmön tuotto rakennuksissa painottuu lämmityskauden ulkopuolelle. Tällöin rakennuksissa on siis viilennystarve, joka voidaan kattaa erilaisin tavoin. Hukkalämpö voidaan myös hyödyntää muissa rakennuksissa lämpöverkon avulla.

Tapoja hyödyntää hukkalämpöä lämpöverkossa ovat viilennys rakennuskohtaisen lämpöpumpun avulla ja lauhdelämmön syöttäminen lämpöverkkoon tai keskitetty viilennys ja lauhdelämmön syöttäminen lämpöverkkoon. Molempia näistä kutsutaan yhdistetyksi kaukolämmöksi ja kaukokylmäksi. Mikäli viilennykseen käytetään absorptiolämpöpumppua, voidaan hukkalämpö ja lämpöverkon lämpö hyödyntää myös pumpun käyttövoimana. [41] Keskitetyssä jäähdytyksessä tarvitaan erillinen verkko viilennysvedelle kun taas rakennuskohtaisessa viilennyksessä kylmäverkkoa ei tarvita, ainoastaan viilennysjärjestelmän poistama hukkalämpö syötetään lämpöverkkoon.

### **2.5.2 Teollisuuden ja maatalouden hukkalämpö**

Lukuisilla teollisuudenaloilla ja maataloudessa hukkalämpöä syntyy eri tuotanto- tai jalostusprosessin vaiheissa. Tyypillisiä teollisuudenaloja, joissa hukkalämpöä syntyy, ovat elintarviketeollisuus, metsätuoteteollisuus, panimoteollisuus, kemian-teollisuus, lääketeollisuus, graafinen teollisuus ja metalliteollisuus. Lisäksi teollisuuden automaation konesalit ja keskitetyt tietokonesalit eli datakeskukset ovat verrattavissa teollisuuden hukkalämmön lähteisiin. (LÄHDE)

Hukkalämpö voidaan hyödyntää itse tuotantoprosessissa tai siihen liittyvissä prosesseissa tai rakennuksissa. Kaikkea lämpöä ei kuitenkaan voida tai ei ole järkevää hyödyntää paikallisesti teollisuuden omaan käyttöön. Tällöin lämpö voidaan hyödyntää muualla lämpöverkon avulla.

Mikäli hukkalämpöä ei hyödynnetä, se lauhdutetaan ympäristöön esimerkiksi jäähdytystornien tai lämpöhäviöiden kautta. Hukkalämpö on teollisuudenalasta ja prosessin luonteesta riippuen sitoutunut eri väliaineisiin. Tyypillisimpiä väliaineita ovat teollisuusprosessien kaasumaiset päästöt, nestemäiset päästöt, viilennykseen käytetyt väliaineet ja kemialliset jätteet. [20]

Teollisuuden hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksiin lämpöverkossa vaikuttavat keskeisesti syntyvän lämmön lämpötilataso, lämmöntuoton jatkuvuus ja tasaisuus ja etäisyys lämmönkulutuksesta. [42] Jokaisen lämmönlähteen kohdalla on erikseen tarkasteltava hukkalämmön hyödyntämisen taloudellisuutta ja soveltuvuutta.

Teollisuuden hukkalämmölle ominaista on vaihteleva ja teollisuuden prosessista riippuva lämmöntuotto. Tästä syystä teollisuuden hukkalämpöä ei voida hyödyntää pääasiallisena lämmönlähteenä lämpöverkossa. [42]

Hukkalämpö voidaan lämmönlähteen ja verkon lämpötilatasosta riippuen ottaa talteen joko suoraan lämpöverkon veteen lämmönvaihtimien avulla tai lämpötilatasoa voidaan nostaa esimerkiksi lämpöpumpun avulla. Jos käytetään useita lämmönsiirtimiä, on syytä hyödyntää kaskadointia, joka yhden lämmönsiirtimen kohdalla vastaisi vastavirtalämmönsiirrintä. [42]

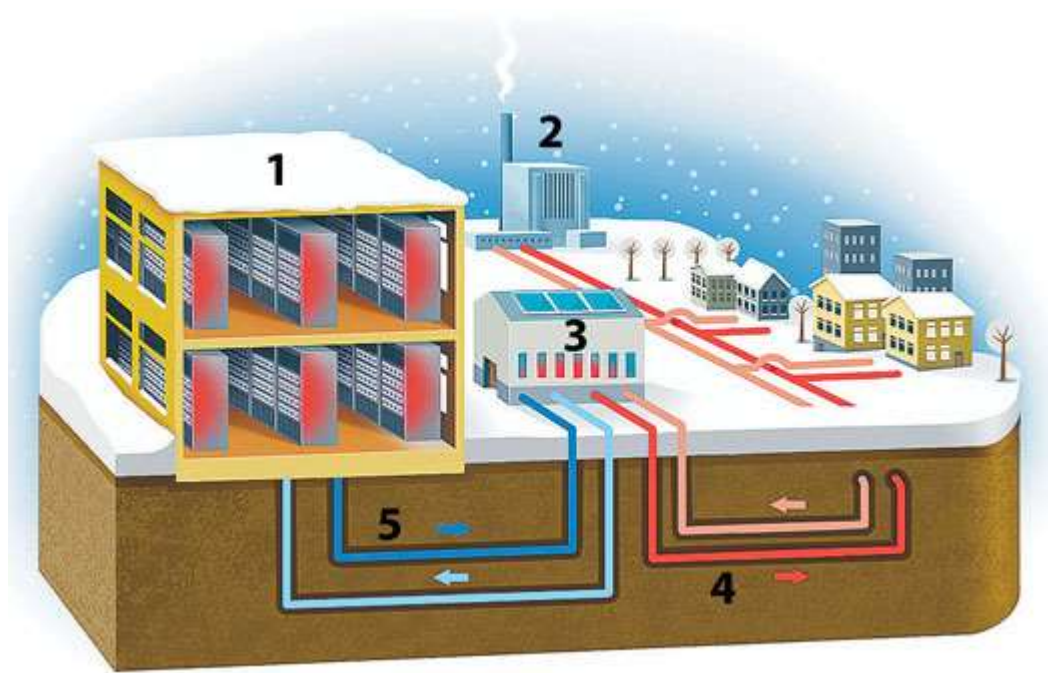
Suomessa hyödynnetään kaukolämmityksessä jonkin verran teollisuuden hukkalämpöä sekä kaukolämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksilla että pelkkänä lämpönä eli erillistuotantona. Kaiken kaikkiaan 1,4 % kaukolämpöjärjestelmässä käytetyistä energianlähteistä oli peräisin teollisuuden hukkalämmöstä vuonna 2013 energiateollisuuden tilastojen mukaan. Erillistuotannossa teollisuuden hukkalämmön osuus oli 6,4 % ja sähkön ja lämmön yhteistuotannossa 0,2% käytetyistä energianlähteistä.

Teollisuuden hukkalämmön mahdollisia tarjoajia Espoossa ovat Espoon kaupungin uusiutuvan energian kuntakatselmuksen mukaan esimerkiksi Espoon jätevedenpuhdistamo, Lumenen kosmetiikkatehdas, kemianteollisuuden yritys Sun Chemical Oy, painotuotteita valmistava Wellprint Oy ja leipomotuotteita valmistava Vaasan Oy. [43]

Esimerkkikohteessa Otaniemessä ei ole teollista tuotantoa. Otaniemeen sen sijaan voitaisiin rakentaa datakeskuksia, joiden tuottama lämpö voitaisiin hyödyntää. Tietävästi datakeskusten hukkalämpöä hyödyntävästä kaukokylmään yhdistetystä mahdollisuudesta on neuvoteltu kiinteistöyhtiön ja kaukolämpöverkon omistajan Fortumin kanssa. Kuitenkin neuvottelujen lopputuloksena datakeskuksen rakentamisesta luovuttiin kannattavuusnäkökohtien vuoksi, sillä investointikulujen jakamisesta ei päästy yksimielisyyteen.

Vastaavaa on kuitenkin tehty muualla Espoossa. Esimerkiksi Otaniemen kaukolämpöverkkoa hallinnoiva Fortum on yhteistyössä Tiedon kanssa rakentanut järjestelmän (kuva 7), jonka avulla hyödynnetään tietokonesalin hukkalämpöä kaukolämpöverkossa. Järjestely on kaukolämmön ja kaukokylmän yhdistelmä. Tämä tietokonesali tuottaa vuodessa n. 30 GWh hukkalämpöä, joka vastaa n. 1500 omakotitalon lämmöntarvetta. Tietokonesalissa hyödynnetään lämpöpumppua, jonka avulla lämmön lämpötilataso nostetaan riittävän korkeaksi ja viilennetään tietokonesalia. Tästä järjestelystä hyöttyy kaukolämpöjärjestelmän lisäksi tietokonesali: koneiden käyttämän sähkön suhde koko salin energiankulutukseen on järjestelmän ansiosta vain 1,2...1,3, kun vastaava luku vanhoissa konesaleissa on n. 2. Jäähdytysenergia

onkin tietokoneiden kuluttaman sähkön ohella konesalien merkittävin yksittäinen käyttökustannus. [44]



*Kuva 7. Tietokonesalin hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa. Järjestelmä: 1. konesali, 2. voimalaitos, 3. lämpöpumppulaitos, 4. kaukolämpöverkko, 5. jäähdytysputkisto (lähde: (32))*

### 3 Lämmön tuotannon ja kulutuksen tasaus

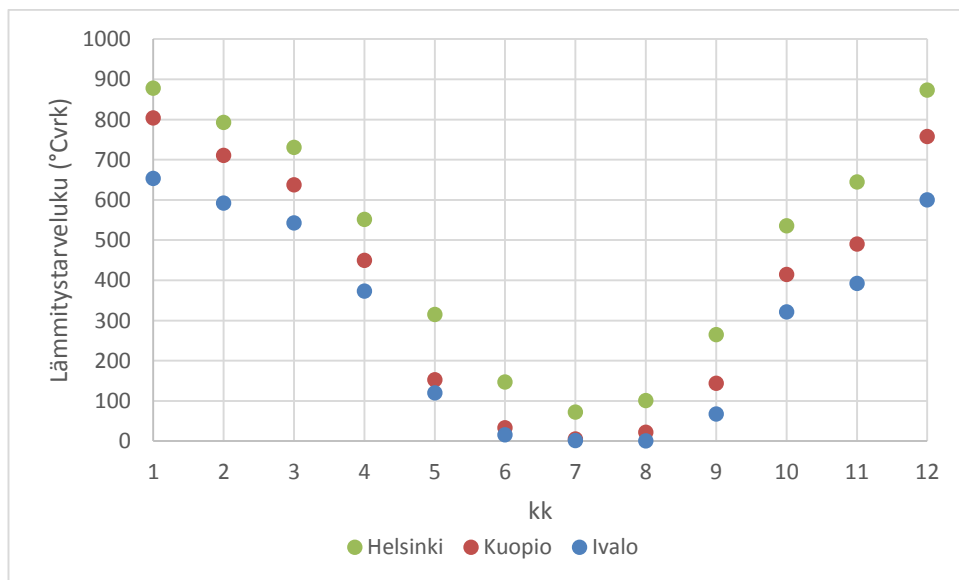
Lämpöjärjestelmässä lämpöä on joka hetki tuotettava yhtä paljon kulutuksen kanssa tai hyödynnettävä erilaisia lämpövarastoja ja varastoitumismekanismeja. Lämpöverkko ja erilaiset lämpövarastot mahdollistavat lämmön tuotannon osittaisen ajoittamisen eri aikaan kulutuksen kanssa. Lämpöverkko myös mahdollistaa lämmön tuotannon useamman kuluttajan tarpeisiin paikallisesti ja koko järjestelmänlaajuisen tasaustapojen hyödyntämisen.

#### 3.1 Tasaustarve

Hajautettuun lämmön ja jäähdytyksen tuotantoon perustuvassa järjestelmässä lämmön tuotanto ei aina ole optimaalista tai edes mahdollista yhtäaikaaisesti kulutuksen kanssa. Tämä johtuu lämmönkulutuksen vaihtelusta ja lämmöntuotantoteknologioiden ominaispiirteistä.

##### 3.1.1 Lämmön kulutuksen vaihtelu

Vuoden aikana lämmön kulutus vaihtelee ulkolämpötilan ja muiden sääolosuhteiden mukaan. Suomessa Ilmatieteen laitos julkaisee lämmitystarvelukuja, jotka kuvaavat rakennusten lämmitysenergian tarvetta. Lämmitystarveluku saadaan laske-  
malla yhteen kunkin kuukauden päivittäisten sisä- ja ulkolämpötilojen erotus. Ilmatieteenlaitos käyttää laskennassa oletuksena +17 °C:een sisälämpötilaa ja vertaa sitä ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvoon. Ilmatieteenlaitoksen julkaisemat lämmitystarveluvut on esitetty kuvassa 8:

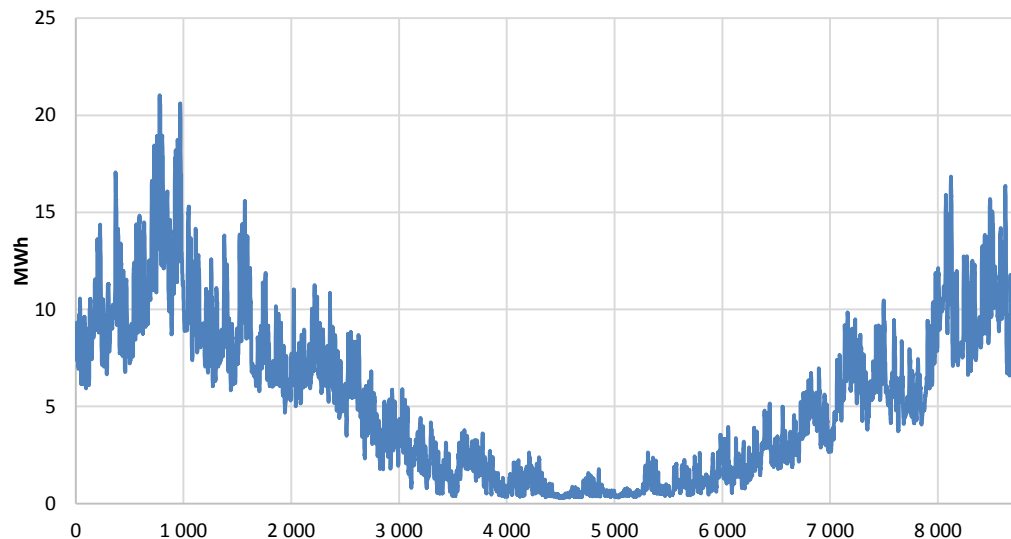


Kuva 8. Vuosien 2010-2014 keskimääräiset lämmitystarveluvut eli astepäiväluvut Helsingissä, Kuopiossa ja Ivalossa.

Yleisesti lämmönkulutuksen lyhyempiaikaiset vaihtelut ovat erityyppisiä asuinrakennuksissa ja toimistorakennuksissa. Toimistorakennuksissa viikonlopun kulutus on usein merkittävästi alhaisempi, sillä ilmanvaihto ei ole useinkaan käynnissä.

Asuinrakennuksissa viikonpäivien välillä ei välttämättä ole niin merkittävää eroa, kuin toimistorakennuksissa.

Esimerkkikohteessa Otaniemessä tässä työssä tarkastellut kiinteistöyhtiön omistamat kohteet ovat opetus-, tutkimus- ja toimistokäytössä. Näiden rakennusten lämmönkulutusta mitataan tunnin tarkkuudella. Vuonna 2012 lämmön kulutusprofiili oli kuvan 9 mukainen.

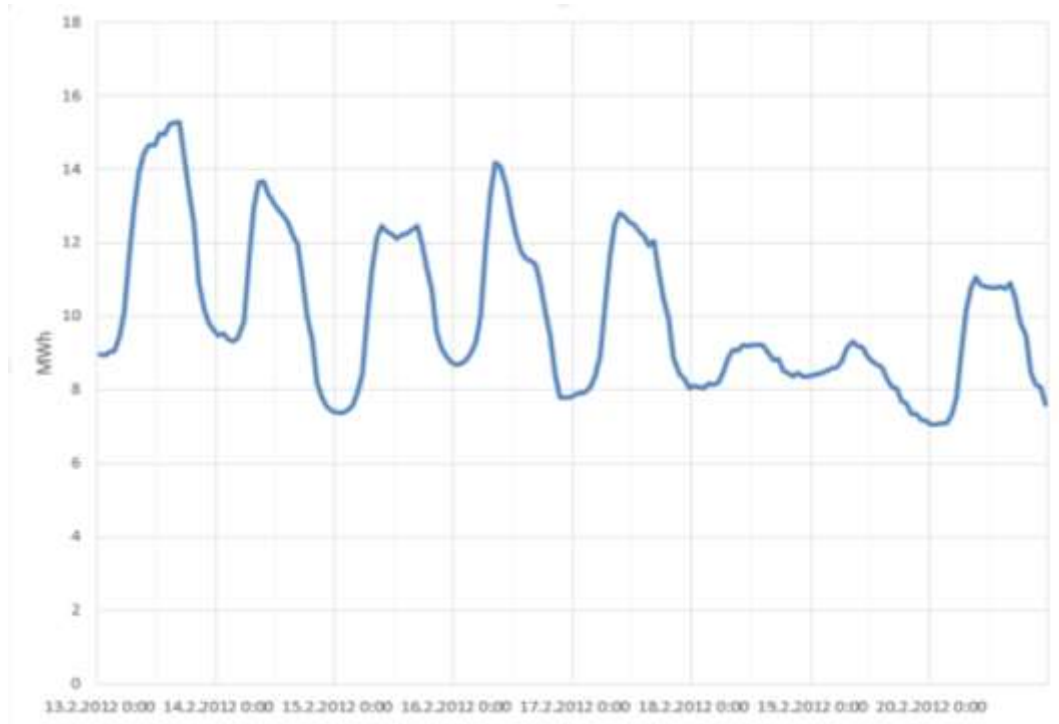


*Kuva 9. Otaniemen Aalto-yliopistokiinteistöt kiinteistöyhtiön omistamien kiinteistöjen lämmönkulutus vuoden 2012 aikana.*

Kuvista 8 ja 9 nähdään hyvin lämmön kulutuksen vaihtelu vuoden aikana. Talvella, kun keskilämpötila on alimmillaan, eli tammi- maaliskuussa ja marras-joulukuussa on lämmitystarve suurimmillaan, jolloin lämpöä kuluu eniten. Kuvasta 9 nähdään, että kesällä lämmönkulutus pienenee paitsi lämpimämmän ulkolämpötilan ansiosta, myös siksi, että kesälomien aikana lämpimän käyttöveden kulutus pienenee opetus- tutkimus- ja toimistotyöhön käytetyissä rakennuksissa.

Lämmitystarve vaihtelee myös lyhyemmällä aikavälillä. Jotta tämä lyhyemmän aikavälin vaihtelu nähtäisiin tarkemmin, on lämmönkulutus 8 päivän ajalta esitetty kuvassa 10.





*Kuva 10. Kiinteistöyhtiön omistamien kiinteistöjen lämmönkulutus 8 päivän aikana ma 13.2.2012 – ma 20.2.2012 aikana.*

Kuvasta 10 nähdään selvästi vuorokausirytmii, jossa lämmönkulutus vähenee illalla ja lisääntyy voimakkaasti aamulla. Tämä selittyy sillä, että suurin osa Kiinteistöyhtiön rakennuksista ei ole käytössä yöllä, sillä ne ovat opetus- tutkimus- ja toimistokäytössä. Yön aikana ilmanvaihto ei useimmissa rakennuksissa ole käynnissä ja myös sisälämpötilan voidaan antaa laskea. Lisäksi lämpimän käyttöveden kulutus pienenee. Kuitenkin peruslämpökuorma on koko helmikuun esimerkkiviikon ajan ollut n. 8 MW. Lisäksi kuvasta nähdään viikonlopun aikainen lämmönkulutuksen pieneneminen (la-su 18.-19.2.). Viikonloppunakin päiväsaikaan on lämmönkulutus ollut hieman suurempaa kuin yöllä, mutta ero ei ole yhtä merkittävää, kuin arkipäivinä.

### **3.1.2 Tuotannon ominaispiirteiden aiheuttama vaihtelu**

Lämmön kulutuksen vaihtelun lisäksi lämmön tuotannon ominaispiirteet aiheuttavat tarvetta tuottaa lämpöä eri aikaan kulutuksen kanssa. Lämmöntuotannon muodoista mikään ei ole täysin riippumaton ja joustava. [45]

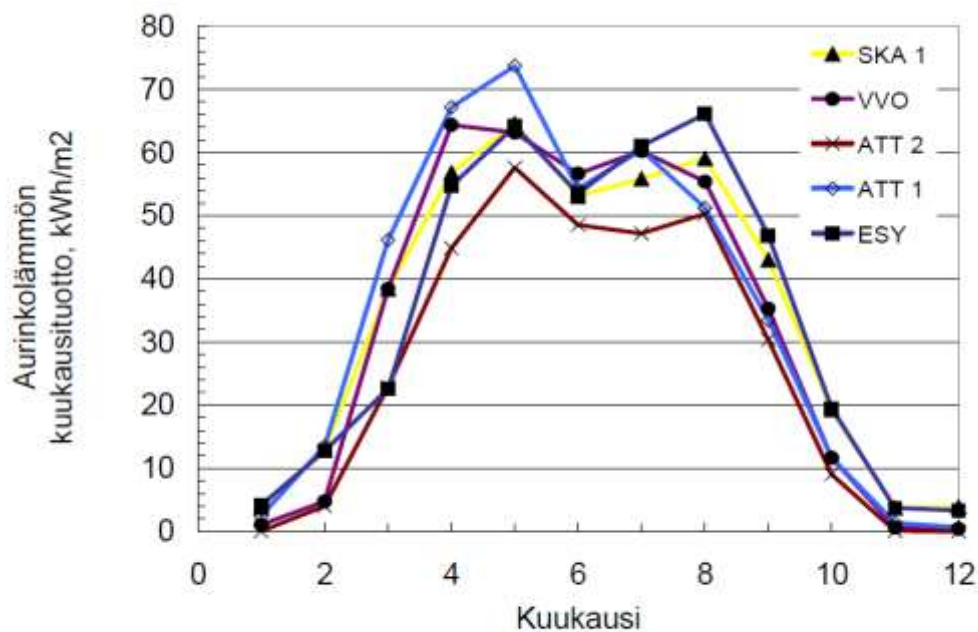
Lämpöenergiajärjestelmässä voidaankin puhua perustehosta, huipputehosta, säädettävästä tehosta ja varatehosta. [22] Tällainen jaottelu perustuu lämmöntuotantomuotojen ominaispiirteisiin ja kustannusrakenteeseen samaan tapaan kuin tuotantomuodot sähköjärjestelmässäkin.

Maalämpöä voidaan säätää asennetun kapasiteetin ja maan lämpömäärän rajoissa lämmön kulutuksen mukaan. Toisaalta sähkön markkinahinta vaikuttaa lämpö-

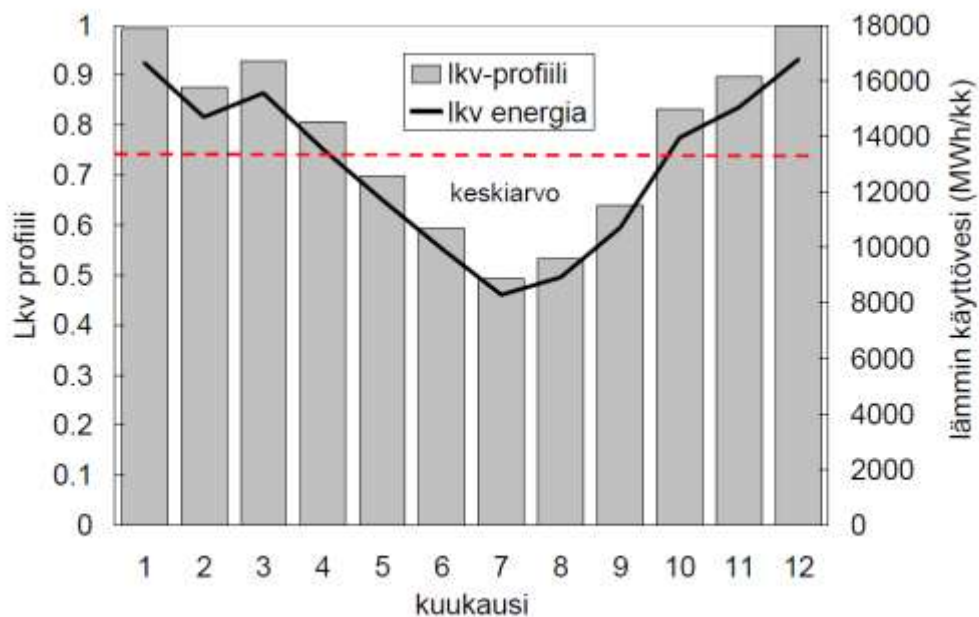
pumppujen toiminnan taloudellisuuteen. Lämpökeskuksissa tuotetun lämmön kannattavuus taas riippuu polttoaineiden hinnan vaihtelusta, jolloin tämä voidaan haluta huomioida lämmöntuotannon ajoituksessa. Yhdistetyn lämmön ja sähkön tuotannon kannattavuuteen vaikuttaa myös sähkön hinnan vaihtelu. Hukkalämmön tuotanto taas riippuu hukkalämpöä tuottavan prosessin tai rakennuksen toiminnan rytmistä. Tuotanto voi hukkalämmön lähteestä riippuen olla hyvin tasaista, kuten esimerkiksi datakeskusten lämmöntuotto, tai hyvin vaihtelevaa, esimerkiksi jonkin teollisuusprosessin hukkalämmön tuotto.

Lämmöntuotantotavoista aurinkolämmön tuotannon vaihteluun ei voida vaikuttaa lainkaan, mutta tuotantoprofiili ja määrä ovat jossain määrin ennustettavissa pitkällä aikavälillä, vuodenaikojen ja kuukauden tasolla.

Esimerkiksi aurinkolämpöjärjestelmiä suunnitellaan joskus lämpimän käyttöveden tuottamiseen, sillä lämmintä käyttövetä tarvitaan kesälläkin, jolloin aurinkolämpöä saadaan eniten. Vuosina 1998–2004 toteutetussa EkoViikki – hankkeessa testattiin aurinkolämpöjärjestelmän käyttöä lämpimän käyttöveden lämmitykseen. Tällöin aurinkolämpöjärjestelmän tuottoprofiilit kuukausitasolla olivat kuvan 11 mukaiset. Kuvasta 3 nähdään, että paras tuotto Viikin aurinkokeräimillä saavutettiin kesäkuukausina, mutta koko helmi-lokakuun aikana lämpöä saatiin talteen. Kuitenkin lämpimän käyttöveden kulutus eräässä Viikin esimerkkikohteessa oli alhaisimmillaan juuri kesäkuukausina, kuten nähdään kuvasta 12.



Kuva 11. Esimerkki aurinkolämmön käytöstä lämpimän veden käyttöön kampuksella: Viikin kampuksen eri aurinkokeräinten tuottoprofiilit kuukausitasolla



Kuva 12. Esimerkki käyttöveden kulutuksesta kampuksella: Viikin kampuksen Helas -kiinteistön lämpimän käyttöveden kulutus kuukausitasolla

Viikin kampus on sikäli vertailukelpoinen esimerkkikohteena olevan Otaniemen kampuksen kanssa, että molemmilla kampuksilla talojen käyttöaste putoaa kesällä kesälomien takia ja siten vähenee myös lämpimän käyttöveden kulutus. Toisaalta kiinteistöyhtiön omistamat kiinteistöt Otaniemessä ovat pääosin opetus- ja toimistokäytössä, kun taas Viikin kampuksen esimerkkikohde, jossa lämpimän käyttöveden kulutusta mitattiin, on asuinkiinteistö. Viikin kampuksen mittaukset toimivatkin kuvaavana esimerkkinä aurinkolämmön tuotannon ja kulutuksen eriaikaisuudesta.

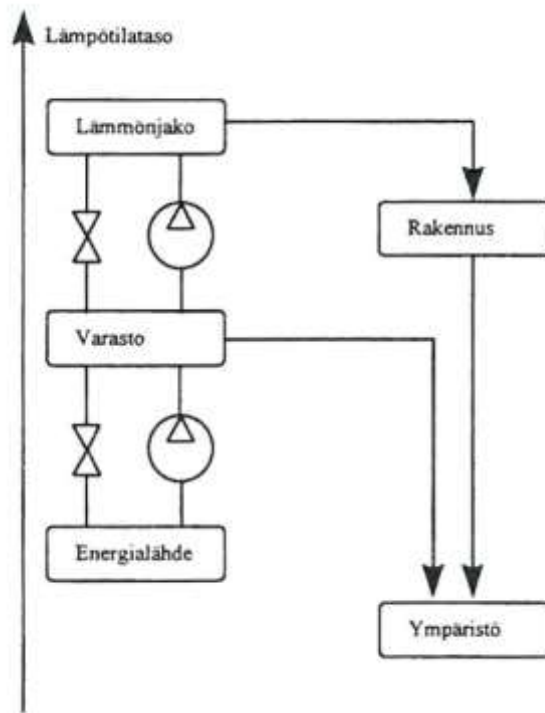
### 3.2 Lämpövarastot tasaustapana

Lämmöntasaustavoista seuraavaksi käsitellään lämpövarastoja. Lämpövarastot voidaan jakaa pitkä- ja lyhytaikaisvarastoihin. Pitkäaikaisvarastoinnilla tarkoitetaan tässä työssä lämmön tai jäähdytysenergian varastoimista kuukaudesta useisiin kuukausiin. Lyhytaikaisvarastoilla tarkoitetaan tässä työssä varastoja, jotka sopivat lämmön tai viileän varastointiin muutamasta tunnista muutamiin viikkoihin.

Lämpöenergian kulutuksen ja tuotannon erojen tasauksen lisäksi lämmön ja jäähdytysenergian varastointia voidaan perustella myös muilla seikoilla. Lämpövarastoja voidaan käyttää myös tuotannon optimaaliseen ajoitukseen. Lämpövarastot voivat toimia myös varajärjestelmänä lämmitysjärjestelmän vauriotapauksissa. Lisäksi lämpövarastoilla voidaan taata lämmöntuotanto ylläpidon ja suunniteltujen korjausten aikana. Sekä lämpöä että jäähdytysenergiaa, eli viileää voidaan varastoida.

Lämpövarastolle olennainen ominaisuus käytännön sovellusten kannalta on lämpötilataso. Jokaisella varastotyyppillä on sille ominainen lämpötila-alue, jolla se voi

toimia. Tarvittaessa lämpötilatasoja varaston latauksen tai purun yhteydessä voidaan myös muuttaa lämpöpumpun avulla [46]. Tällaista mahdollisuutta on kuvattu



kuvassa 13.

*Kuva 13. Lämpöpumpun avulla lämpövaraston lämpötilatasoa voidaan muuttaa tarpeeseen sopivaksi. Kuvassa on esitetty lämpöpumpun mahdolliset sijoitustavat lämpövaraston yhteyteen [46].*

Kuvasta 4 nähdään, että lämpöpumpun avulla sekä energianlähteestä saatavan lämmön että varastosta purettavan lämmön lämpötilatasoa voidaan tarvittaessa nostaa.

### 3.2.1 Varastotyypit

Lämpö- tai viileävarasto voi perustua väliaineen sitomaan tuntuvaan lämpöön, faasimuutosmateriaalin sitomaan latenttilämpöön tai termokemiallisen materiaalin kohdalla kemiallisen reaktion sitomaan tai vapauttamaan lämpöön.

Tuntuvan lämmön varastointi väliaineeseen tarkoittaa, että väliainetta lämmitetään, jolloin sen lämpötila nousee ja aine sitoo lämpöä ominaislämpökapasiteetista ja lämpötilasta riippuvan määrän.

Faasimuutosmateriaalia ladattaessa taas materiaalin lämpötila ei juuri nouse, vaan lämpö kuluu faasimuutokseen, eli aineen sulattamiseen, höyrystämiseen tai kiinteän aineen hilarakenteen muuttumiseen. Kun materiaalin faasimuutos palautuu, se vapauttaa sitomansa lämmön, jota kutsutaan latenttilämmöksi. Faasimuutos voi joko tapahtua itsekseen lämpötilasta riippuen, esimerkiksi tasaten vuorokauden lämpötilan vaihteluita tai lämpövaraston purkaminen voidaan tehdä juuri halutulla ajanhetkellä esimerkiksi aloittamalla kiteytyminen keinotekoisesti. (Lähde)

Kemialliseen reaktioon perustuvassa varastossa taas lämpö sitoutuu endotermisen kemiallisen reaktion ”käyttövoimaksi”. Kun varasto puretaan, kemiallinen reaktio palautuu ja lämpöä vapautuu. (Lähde)

### **Faasimuutosvaraaja**

Eri faasimuutosmateriaaleja ovat parafiinit, rasvahapot, polymeerit, suolahydraatit, sokerialkoholit ja erilaiset yhdistelmämaterialit [47]. Faasimuutosvaraajan ominaisuudet, kuten lämpötilataso, eli lataus- ja purkulämpötila riippuvat materiaalista.

Faasimuutosvaraajia voidaan käyttää sekä pitkä- että lyhytaikaiseen lämmön varastointiin. Lyhytaikaiseen lämmönvarastointiin sopivat parhaiten ns. passiiviset faasimuutosvaraajat, jotka latautuvat ja purkautuvat lämpötilanmuutoksen mukaan. Näitä varaajia käytetään jo kaupallisesti esimerkiksi erilaisiin rakennusmateriaaleihin integroituina [47]. Pitkäaikaiseen varastointiin sopivat faasimuutosvaraajat taas voivat olla myös ns. aktiivisia varaajia, joiden varaama lämpö voidaan purkaa haluttuna ajanhetkenä. Pitkäaikainen latenttilämmön varastointi on vielä kokeellisella tasolla [48].

### **Tuntuvan lämmön varastot**

Tuntuvan lämmön varastot voivat olla pitkäaikais- tai lyhytaikaisvarastoja. Tuntuvan lämmön varastot perustuvat varastossa olevan väliaineen lämpökapasiteettiin. Väliaine on usein vesi, jota varastoidaan erilaisiin säiliöratkaisuihin. Näitä säiliöitä ovat esimerkiksi rakennusten lämminvesivaraajat, porareikävarastot, terässäiliöt, betonisäiliöt, kaivantovarastot ja kalliolämpövarastot. Myös pohjavettä voidaan käyttää lämmön varastointiin.

Mahdollinen lämpötilataso varastossa riippuu siitä, onko varasto paineistettu vai ei. Paineistetussa varastossa veden lämpötila voidaan nostaa yli 100 asteen. Paineistamattomassa varastossa lämpötilan on oltava alle 100 astetta, sillä vesi ei saa kiehua varastossa. Varastossa vesi kerrostuu lämpötilan mukaan niin, että kylmin vesi menee pohjalle. Tästä syystä vesivarastossa on useita eri lämpötiloja. Vesivarastoja voidaan käyttää myös viileän varastointiin, 5...20 asteen lämpötiloissa.

Lämpövarastoista terässäiliöt [49], kalliovarastot [49] ja pohjavesivarastot voivat olla paineistettuja tai paineistamattomia. Paineistamattomista varastoista kaivantovaraston lämpötilataso on tyypillisesti 5...70 °C, ja porareikävaraston -20...90 °C. [49]

Porareikävarasto sopii paremmin lämmön pitkäaikaisvarastointiin. [49] Kaivantovarasto, terässäiliöt, betonisäiliöt, kalliovarastot ja pohjavesivarastot sopivat myös lämmön lyhytaikaisempaan varastointiin. [50]

### **Lämpöverkko lämpövarastona**

Lämpöverkkoa voidaan myös käyttää lyhytaikaisena lämpövarastona. Lämpövarastona voidaan käyttää joko meno- tai paluuvettä. [50]

Mikäli menovettä käytetään lämpövarastona, voidaan joko nostaa tai laskea menoveden lämpötilaa ohjearvoon verrattuna. Lämpöverkon menoveden lämpötilaa nostetaan tyypillisesti 5...15 °C normaalia lämpötilaa lämpimämmäksi 2-3 tunnin ajaksi. Lataus purkautuu, kun lämpimämpi vesi tulee lämmönkuluttajien laitteisiin. Tällöin voidaan varautua esimerkiksi ennustettuihin lämpötehopiikkeihin etukäteen. Menoputkeen voidaan myös syöttää vähemmän lämpöä, jolloin lämpötila laskee ja tämä kompensoidaan kasvattamalla virtausta ja lämmön määrää lisätään taas myöhemmin. Tällöin hyödynnetään verkon kapasiteettia lämmön tuotannon optimoinnissa. [50]

Paluuveden lämmitys on myös mahdollista varastointitarkoituksessa. Tällöin paluuputken materiaalin tulee olla suunniteltu kestämaan korkeampaa lämpötilaa. [50]

Kun verkon lämpötilatasoa muutetaan lyhyellä aikavälillä lisää tämä lämpöjännityksiä verkossa. [51] Lämpöjännitysten kasvu voi lisätä vaurioriskiä verkossa. Tämä on otettava huomioon verkkoa käytettäessä lämpövarastona.

Kun verkossa hyödynnetään laajasti hajautettua lämmöntuotantoa, on tämä huomioitava lämpöverkon lämpötilaa nostettaessa. Hajautetun lämmöntuotannon lähteistä ei välttämättä pystytä syöttämään yhtä aikaa juuri saman lämpöistä vettä verkkoon. Tämä voi lisätä lämpöjännityksiä verkossa.

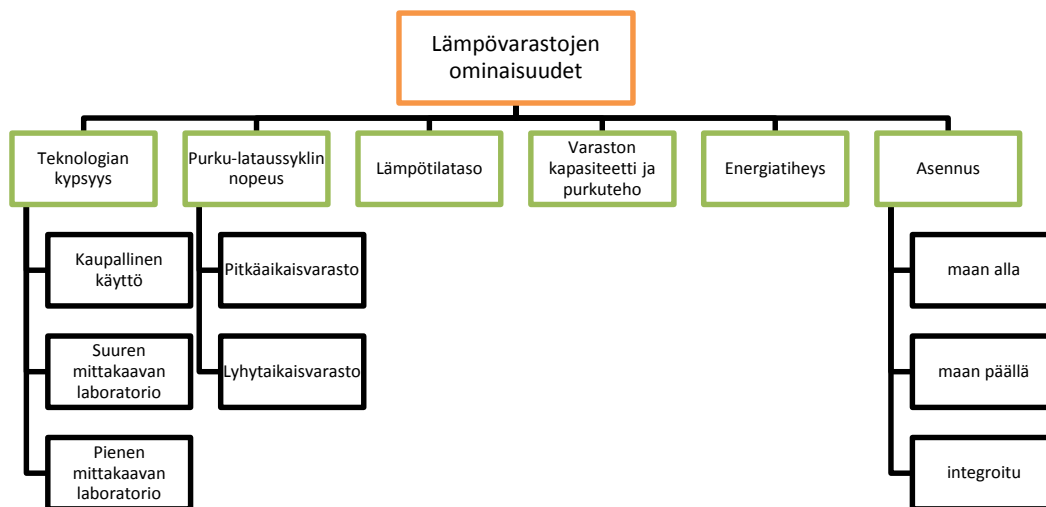
### **3.2.2 Varastotyypin valinta**

Eri varastointiteknologiat ovat kehityskaarensa eri vaiheissa. Osa teknologioista on kaupallisessa käytössä, osa kaupallisen mittakaavan laboratoriotutkimusvaiheessa ja osa vasta pienen mittaluokan laboratoriotutkimusvaiheessa.

Lämmön pitkäaikaisvarastoinnissa pisimmällä ovat tuntuvaan lämpöön perustuvat teknologiat, kuten lämmön vesivarastot ja maavarastot [48]. Lyhytaikaisvarastoinnissa tuntuvaan lämpöön perustuvien varastojen lisäksi myös faasimuutosvaraajat ovat kaupallisessa käytössä erityisesti rakennusmateriaaleihin integroituina [47]. Voidaan kuitenkin olettaa, että vuoteen 2030 mennessä (kohdealueen energiaomavaraisuuden saavuttamisen tavoitevuosi) yhä useampi varastointiteknologia saavuttaa kaupallisen käytön, joten mitään teknologiaa ei vielä ole rajattu tässä työssä esitelyjen ulkopuolelle.

Käytännössä lämmönlähde määrittää sen, missä lämpötilassa varasto ladataan ja toisaalta lämmön tai viileän käyttötarkoitus määrittää missä lämpötilassa lämpö puretaan. Lisäksi mikäli varasto on kytketty lämpöverkkoon, määrää lämpöverkon lämpötila varaston purku- tai latauslämpötilan. Toisin sanoen varastotyypin valinta rajoittaa haluttu lämpötilataso. Kuten aiemmin on kerrottu, varastoon syötettävän ja varastosta purettavan lämmön lämpötilatasoa voidaan tarvittaessa muuttaa lämpöpumpun avulla.

Lämpövarastojen valintaan vaikuttavat ominaisuudet on koottu kuvaan 14.



Kuva 14. Lämpövarastojen ominaisuudet, jotka vaikuttavat lämpövaraston suunnitteluun ja valintaan

Lämpövarastolta vaaditut ominaisuudet kuten lämpötilataso ja kapasiteetti, varaston sijainnin geologiset ominaisuudet ja sijaintia koskevat määräykset ja kaavoitus, varastolle käytössä oleva tila sekä taloudelliset seikat määräävät minkä tyyppinen lämpövarasto mihinkin kohteeseen sopii.

### 3.2.3 Varaston kytkeminen lämpöverkkoon

Lämpövarasto voidaan kytkeä suoraan, lämmönvaihtimen [50] tai lämpöpumpun kautta [46] lämpöverkkoon.

Suorassa kytkennässä lämpöverkon vettä syötetään suoraan varastoon. Varasto puretaan joko meno- tai paluuveteen lämpötilatasosta riippuen. Suora kytkentä on mahdollinen vain tuntuvaan lämpöön perustuvassa vesivarastossa, käytännössä teräsvarastossa veden riittävän puhtauden takaamiseksi. Suorassa kytkennässä on huolehdittava vesivaraston paineensäädöstä [50]

Lämmönvaihtimen kautta voidaan siirtää lämpöä mihin tahansa varastotyyppiin. Toisaalta lämmönsiirrin kasvattaa lämpövarastojärjestelmän hintaa ja pienentää varastoitavan lämmön lämpötilatasoa.

Lyhytaikaiset rakennuskohtaiset lämpövarastot kytketään rakennuksen lämmönjakokeskuksessa. Rakennuksen rakennusmateriaaleissa käytetyt faasimuutosvaraajat kytkettyvät verkkoon välillisesti rakennuksen tasaantuneena lämmönkulutuksena.

### 3.2.4 Lämpöhäviöt varastoista

Lämpöhäviöt tuntuvaan lämpöön perustuvissa varastoissa riippuvat varaston ja ympäristön lämpötilaerosta, varaston ulkopinta-alasta, siitä onko varasto upotettu maahan ja mahdollisten eristeiden ominaisuuksista. Mitä suurempi varaston sisältämä

lämpöenergia on varaston ulkopinta-alaan nähden, sitä vähemmän lämpöhäviöitä varastosta ympäristöön tapahtuu. Mitä pienempi varastoyksikkö on, sitä suurempi on pinta-ala suhteessa varaston kokoon ja sitä suuremmat siis ovat suhteelliset lämpöhäviöt ympäristöön. [19]

Lämpövaraston tehokkuutta kuvaavat varaston energiahyötysuhde ja varaston lämpötilahyötysuhde. Energiahyötysuhde tarkoittaa varastosta puretun lämpöenergian suhdetta varastoon ladattuun lämpöenergiaan. Lämpötilahyötysuhde  $\eta_T$  tarkoittaa latauksen jälkeisen varaston lämpötilan ( $T_1'$ ) ja ympäristön lämpötilan ( $T_y$ ) erotuksen suhdetta varaston lämpötilan ( $T_1$ ) ja ympäristön lämpötilan ( $T_y$ ) erotukseen ennen latausta seuraavan yhteyden mukaan:

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_y}{T_1' - T_y}, \quad (2)$$

jossa  $T_1$  on loppulämpötila varastossa,  $T_y$  ympäristön lämpötila,  $T_1'$  alkulämpötila varastossa. [50]

Varaston energiahyötysuhde  $\eta_Q$  taas kuvaa varaston lämpöenergian varastointikykyä, eli häviöiden suuruutta:

$$\eta_Q = \frac{Q_{\text{purettu}}}{Q_{\text{ladattu}}}, \quad (3)$$

jossa  $Q_{\text{purettu}}$  on varastosta purettavissa olevan lämpöenergian määrä ja  $Q_{\text{ladattu}}$  varastoon ladatun lämpöenergian määrä.

Jos kyseessä on ominaislämpökapasiteettiin perustuva tuntevan lämmön varasto, voidaan energiahyötysuhde esittää seuraavasti:

$$\eta_Q = \frac{m_p c_p (T_1 - T_2) t_p}{m_l c_p (T_1' - T_2') t_l}, \quad (4)$$

jossa  $m_p$  on varastosta puretun lämpimän veden määrä ja  $m_l$  on varastoon ladatun lämpimän veden määrä,  $c_p$  on veden ominaislämpökapasiteetti,  $t_p$  ja  $t_l$  ovat keskimääräiset latauslämpötilat ja  $T_1$  ja  $T_2$  veden loppu- ja alkulämpötilat lataus- ja purkutilanteissa.

Energiahyötysuhteen ja lämpötilahyötysuhteen tulo on lämpövaraston termodynaaminen hyötysuhde, joka on sitä parempi, mitä vähemmän lämpöhäviöitä tapahtuu. Tyypillisesti veteen perustuville pitkäaikaisvarastoille hyötysuhde on 0,5...0,7 luokkaa. [50]

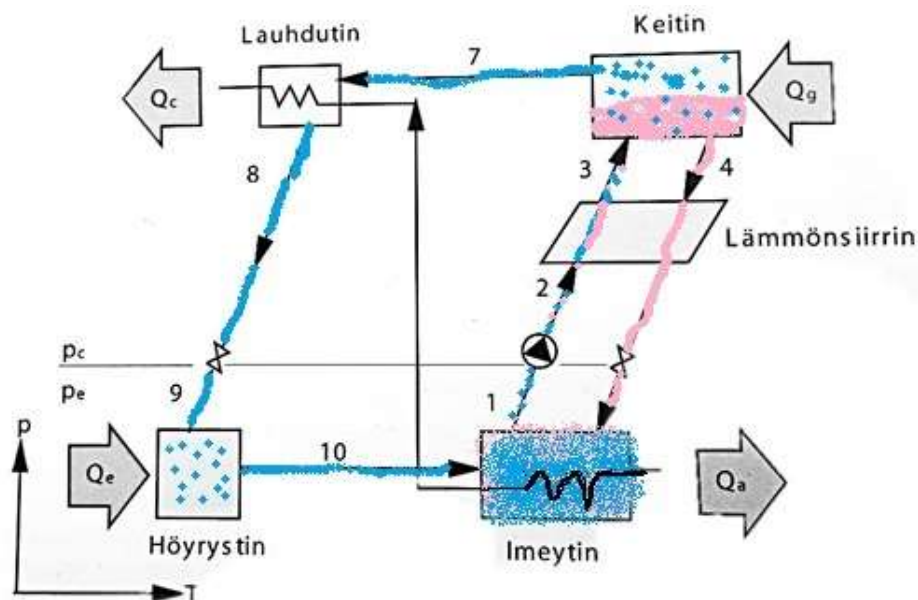
### 3.3 Muut lämmöntasaustavat

Lämpövarastojen lisäksi lämmön kulutusta ja tuottoa voidaan tasata myös hyödyntämällä hukkalämpöä jäähdytyksessä ja kulutuksen jouston avulla käyttämällä hyödyksi kiinteistöjen omaa lämpökapasiteettia.



### 3.3.1 Lämmön hyödyntäminen viileän tuottamiseen

Kaukojäähdytyksessä kiinteistöä jäähdytetään siirtämällä ylimääräinen lämpö kaukojäähdytysveteen. Ylimääräistä lämpöä voidaan myös hyödyntää jäähdytyksessä: jäähdytys tuotetaan absorptiotekniikalla, jossa käyttöenergiana hyödynnetään rakennuksessa syntyvää hukkalämpöä ( $Q_g$  kuvassa 15). Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 15. [52]



Kuva 15. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate [52]

Lämmön hyödyntäminen viilennykseen on hyvin järkevää. Tällöin rakennusten hukkalämpö voidaan hyödyntää samojen rakennusten viilennyksessä. Samoin aurinkolämmön käyttäminen viilennykseen kesällä on järkevää, sillä viilennystarve on suurimmillaan silloin kun aurinkolämmön tuotto on suurimmillaan. Aurinkolämmöllä ja viilennysjärjestelmällä on siis vahvat synergieadut.

### 3.3.2 Kulutuksen jousto

Rakennusten lämpötila ei muutu yhtä nopeasti, kuin lämmitysjärjestelmään syötetty lämpö vähenee. Tämä johtuu rakennusten suuresta lämpökapasiteetista eli ns. termisestä massasta. Rakennusten termisen massa muodostaa siis lyhytaikaisen lämpövaraston, joka itsessään tasaa lämmönkulutuksen heilahteluja. Tätä termistä massaa on erityisen paljon energiatehokkaissa rakennuksissa. Myös Suomessa rakennusmateriaalina yleinen betoni on hyvin lämpöä sitova. [45]

Rakennusten termisen massa siis mahdollistaa lämmönkysynnän lyhytaikaisen jouston. Kysynnän jouston avulla voidaan pienentää lämmönkulutuksen huippuja, tasata tai optimoida lämmöntuotannon ajoitusta marginaalikustannusten perusteella, tai pienentää kokonaiskulutusta. [45] Näitä eri tavoitteita kysynnänjoustolle on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Avoimen energiaverkon mahdollistaman kysynnänjouston erilaisia tavoiteltuja vaikutuksia

Tehopiikkien tasoittamista kysynnänjouston avulla voidaan tehdä ennakoimalla eli ”lataamalla” taloa etukäteen ja piikin jälkeen lataamalla uudestaan. Piikit voidaan myös jättää kattamatta, jolloin lämpömäärä tasataan pidemmällä aikavälillä. [45] Mikäli kysyntää voidaan ohjata älykkäästi huonelämpötiloihin perustuen, voidaan lämmön kokonaiskysyntää vähentää vähentämällä liikaa lämmitystä.

Lämmönkysynnän jousto lämmön (ja yhteistuotannon tapauksessa sähkön tukkuhinnan) marginaalikustannusten perusteella voi olla myös riippumaton kysynnästä. Tällöin tehdään lyhyitä pienennyksiä syötetyn lämmön määrään ennakoitujen korkeiden tuotantokustannusten aikaan.

Kysynnänjousto on kuitenkin tehtävä niin, etteivät rakennuksen käyttäjät kärsi rakennuksen lämmönkulutukseen tehtävistä muutoksista. Otaniemessä on tehty kysynnänjoustopilotti, jossa kysynnänjouston toteutusta on testattu käytännössä tästä näkökulmasta.

Pilotin tavoitteena on ollut selvittää kysynnänjouston ajallisen pituuden ja patteriverkoston menoveden lämpötilan alentamisen rajoja. Tavoitteena on ollut myös kartuttaa kokemuksia kysynnänjouston toimintavarmuudesta ja laitteiden toiminnasta. Kysynnänjoustojen toteuttamisen jälkeen tuloksista voidaan laskea myös lämpötehon ja mahdollisesti lämpöenergian kulutuksen pienentymä.

TuAs-talon kysynnänjoustopilotissa lämmitysverkostoon menevän menoveden lämpötilaa on rajoitettu ennalta määrättyinä ajankohtina. Menoveden lämpötilan alentamista ja alentamisen kestoja on kasvatettu asteittain pilotin edetessä. Patteriverkoston menoveden lämpötilan alentaminen on ollut 5...20 astetta ja kysynnänjouston kesto 2...4 tuntia. Samaan aikaan on seurattu huoneiden lämpötiloja. Lisäksi on seurattu rakennuksen käyttäjien tyytyväisyyttä lämpötilaan kyselytutkimuksen ja elektronisten tyytyväisyyspalautelaitteiden (ns. hymynaamalaite) avulla.

Kysynnänjoustopilotti on vielä tätä tutkimusta kirjoitettaessa kesken. Tähän mennessä kuitenkin on saatu ainakin seuraavia tuloksia: 10 asteen kysynnänjousto 2 tunnin ajan ei vielä muuta sisälämpötilaa niin paljon, että tämä erottuisi huonelämpötilojen normaalista vaihtelusta. Käyttäjätyytyväisyydessä ei ole ollut havaittavissa muutoksia kysynnänjoustosta johtuen, vaikka suurimmat kysynnänjoustot ovatkin alentaneet huonelämpötiloja.

Kysynnänjoustopilotin aikana joululomalla tapahtui myös niin, että menoveden lämpötilaa säättävä venttiili jäi laitehäiriön vuoksi pitkäksi aikaa liian pienelle. Tämä poikkeama huomattiin vasta usean päivän kuluttua, sillä rakennuksessa ei ollut juurikaan käyttäjiä joululomalla. Poikkeama korjattiin, ja suuren talon lämpiäminen takaisin normaaliin lämpötilaan kesti kuitenkin kauan. Poikkeaman jälkeen järjestelmään lisättiin hälytysrajat, jotka jatkossa katkaisevat kysynnänjouston, mikäli sisälämpötila tippuu kolmessa eri pisteessä alle hälytysrajan.

Kaiken kaikkiaan pilotti on osoittanut, että kysynnänjousto voidaan hyödyntää tietyissä rajoissa käyttäjätyytyväisyyden kärsimättä. Kuitenkin tulevaisuudessa on selvitetävä, kuinka kysynnänjoustosta saatavat hyödyt jaetaan kuluttajan ja lämmönmyyjän kesken.

## 4 Lämmön siirto lämpöverkon avulla

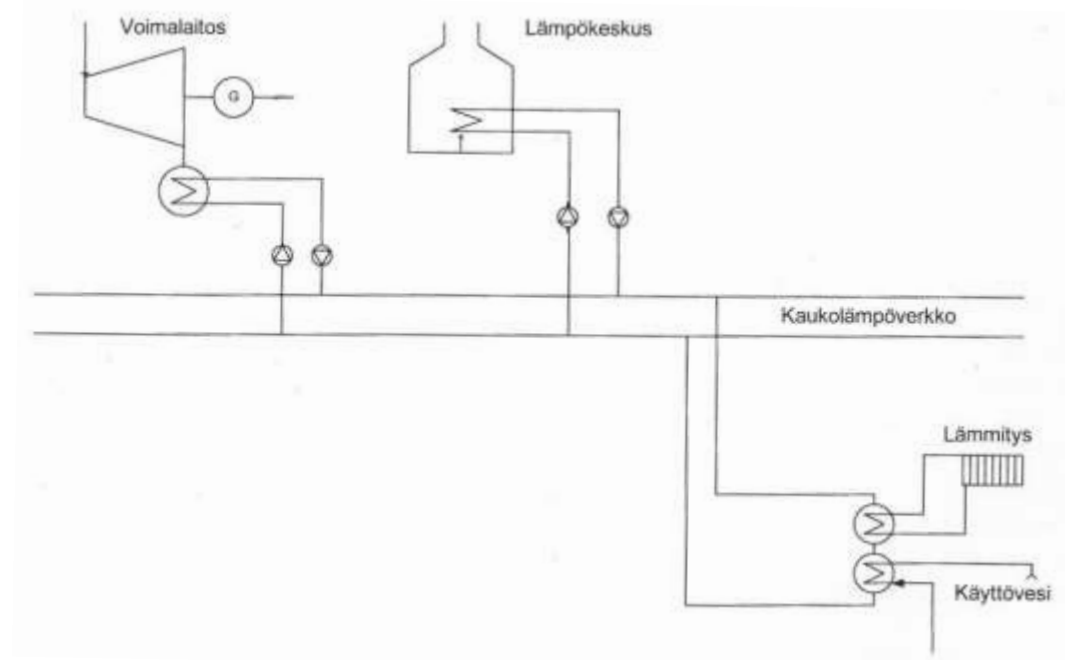
Lämpöputket muodostavat lämpöverkoston liittäen yhteen kuluttajat eli lämpöverkkoon liitetyt rakennukset, lämmön tuotannon ja mahdolliset lämpövarastot. Perinteinen lämpöverkko Suomessa on kaukolämpöyhtiön omistama kaukolämpöverkko. Lämpöyhtiö hallinnoi verkkoa ja tuottaa lämmön verkkoon. Lämmön tuotto ja siirto ovat siis saman luonnollisen monopolitoimijan hallussa, toisin kuin sähköverkossa, jossa energia ja siirto on eriytetty.

Tässä luvussa tarkastellaan erityisesti millaisia vaatimuksia hajautettu lämmöntuotanto asettaa lämpöverkolle ja toisaalta mitkä lämpöverkon ominaisuudet ovat tärkeitä hajautetun lämmöntuotannon kannalta.

### 4.1 Lämpöverkko ja kaukokylmäverkko

Tässä työssä lämmön siirtoa tarkastellaan veteen sitoutuneena tuntuvana lämpönä. Lämmön tuotantopaikalla tai lämpövarastossa lämpö sitoutuu veteen useimmiten lämmönsiirtimien välityksellä ja lämmennyt vesi siirretään lämpöputkia pitkin lämpöä kuluttaviin rakennuksiin ja teollisuuslaitoksiin.

Lämpöverkko koostuu useimmiten vähintään kahdesta putkesta, eli meno- ja paluuputkesta, tällöin puhutaan kaksiputkijärjestelmästä. Menoputkeen syötetään lämpö ja siitä kuluttajat ottavat lämmön ja paluuputkeen syötetään viilennyt vesi, joka taas kiertää takaisin lämmöntuotantopaikkaan. Toisin sanoen sama vesi kiertää järjestelmässä. [2] Kaksiputkijärjestelmän periaate on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Kaukolämmön kaksiputkijärjestelmä on tavallisin lämpöverkkotyyppi Suomessa. Lämpö siirretään lämmön tuottajalta verkkoon menoputkeen ja kuluttajan lämmönsiirtimissä viilennyt kaukolämpövesi syötetään paluuputkeen. Lähde: [2]

Kaksiputkijärjestelmää vastaava kolmiputkijärjestelmä on myös mahdollinen. Kolmiputkijärjestelmässä menoputkia on kaksi, joista toiseen syötetään teollisuuden prosesseja varten kuumempaa vettä ja toiseen rakennusten lämmitystä varten hie-  
man viileämpää vettä. Joissakin maissa käytössä on myös neliputkijärjestelmiä, joissa tilojen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen on omat meno- ja paluuputket, tällaiset järjestelmät ovat tavallisia esimerkiksi Itä-Euroopassa. Harvinaisin on yksiputkijärjestelmä, jossa ei ole erikseen paluuputkea, vaan verkkoon syötetään lisää vettä ja lämmin paluuvesi hyödynnetään muilla tavoin. Tällainen järjestelmä on käytössä osissa Islantia. [53]

Lämpöverkon virtausputket ovat joko teräsputkia, muoviputkia, kupariputkia, tai ohutseinäisiä korrugoituja teräsputkia. Suomessa virtausputki on useimmiten terästä, sillä se kestää hyvin 120 asteen menoveden lämpötilat. Jos menoveden lämpötila ei ylitä 90 astetta, voidaan käyttää muoviputkia. [2]

Virtausputken ympärillä on eriste ja eristeen ympärillä polyeteenimuovikuori tai betonikanava. Betonikanavaisissa putkissa eristeenä voi olla mineraalivillaa tai polyuretaanivaahtoa. Muovikuorisissa lämpöputkissa eristeenä käytetään vaahdotettua polyeteeniä, polyuretaanivaahtoa tai mineraalivillaa. Eriste voi olla kiinni virtausputkessa tai irrallaan virtausputken ja suojakuoren välissä, jolloin virtausputken ympärillä on erillinen suojaputki. Nykyään lämpöverkkojen rakentamiseen Suomessa käytetään lähes pelkästään muovikuorisia lämpöputkia, joissa eriste on kiinnivaahdotettu virtausputkeen. Meno- ja paluuputket eristeineen voivat olla saman kuoren sisällä, jolloin puhutaan kaksiputkisesta johdosta (Mpuk) tai molemmilla voi olla omat kuoret, jolloin puhutaan yksiputkisesta johdosta (2 Mpuk). [2]

Virtaus kaukolämpöputkessa saadaan aikaan imu- ja painepuolen välisen paineeron avulla, jonka saavat aikaan pumput. Asiakkaalle taataan yleensä 0,6 barin paine-ero. Pumput paitsi aikaansaavat tarvittavan paine-eron putkistossa myös korvaavat virtauksessa syntyvät painehäviöt. Verkostossa pumppuja on paitsi alkupäässä, kuten suurten lämmöntuotantoyksiköiden yhteydessä myös verkon keskellä ja reuna-alueilla on välipumppaamoja. Lisäksi verkostossa on sulkuventtiileitä, joilla voidaan tarvittaessa sulkea osia verkosta kunnostustöiden tai verkkoliittymän rakennuksen ajaksi, ohitusventtiilejä suurten sulkuventtiilien rinnalla, säätöventtiileitä, tyhjennysventtiileitä ja ilmanpoistoveniileitä. Venttiilit sijaitsevat kaukolämpökaivoissa, jolloin niitä on mahdollista huoltaa ja vaihtaa. [53]

Kuluttajien käyttöön lämpö siirretään vedestä joko siten, että lämpöverkossa kiertävä vesi kiertää myös kuluttajien patteriverkostossa tai siten, että lämpö siirretään lämmönsiirtimien avulla patteriverkostossa kiertävään veteen, lämpimään käyttöveteen ja mahdollisesti ilmanvaihtokoneen syöttämään ilmaan. [53] Rakennusten jatkemisesta verkkoon kerrotaan tarkemmin alaluvussa 4.3.

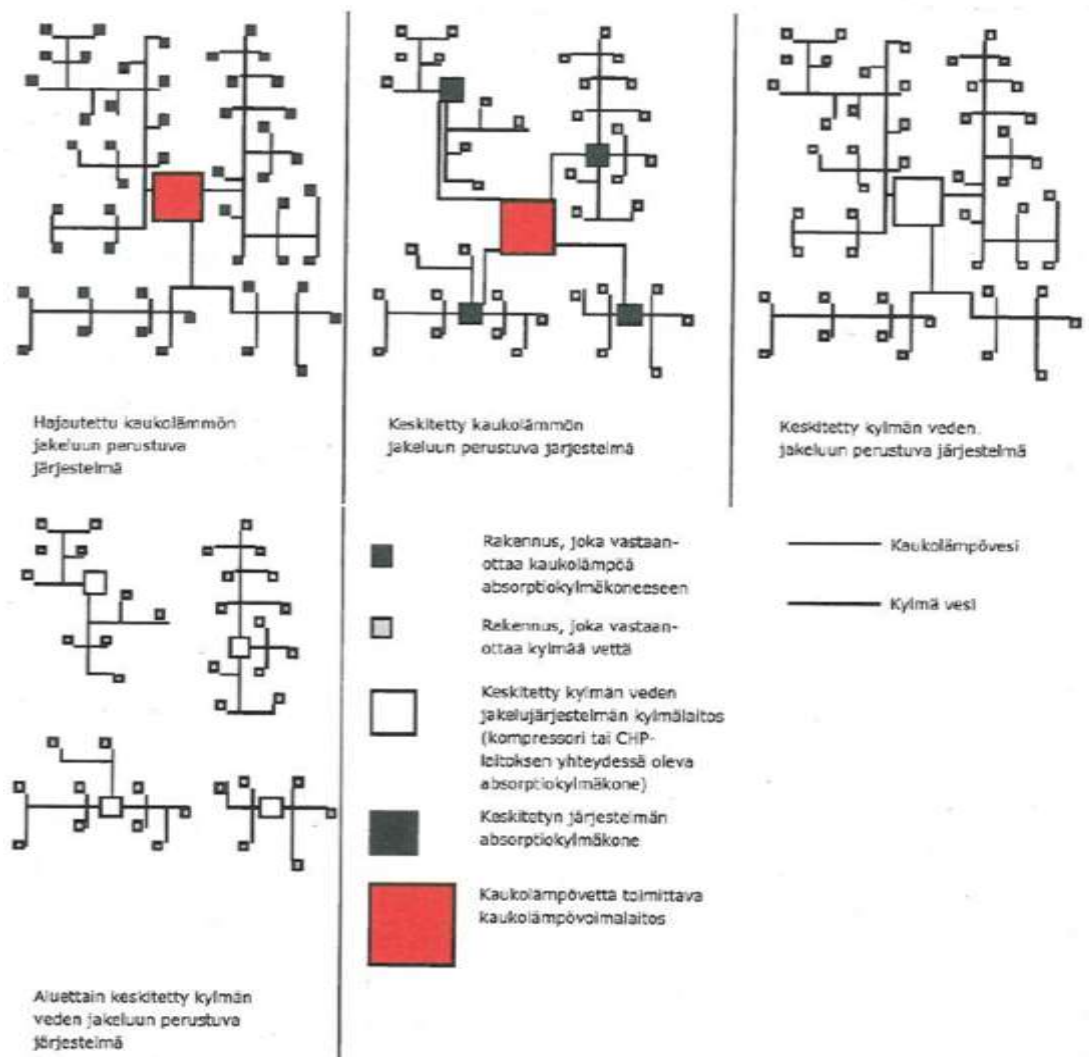
Lämpöverkossa voidaan käyttää myös suuria lämmönsiirrinasemia, jotka mahdollistavat eri lämpötila- ja painetasojen pitämisen erillään. Suurissa verkoissa ne ovatkin lähes välttämättömiä lämpötilojen ja paineiden hallitsemiseksi, sillä etäisyydet ja virtaamat ovat suuria. [53]

Lämpöputket voivat muodostaa erikokoisia järjestelmiä pienistä alueellisista verkoista aina suurkaupunginlaajuisiin verkkoihin. Lämpö voidaan tuottaa yhdessä tai muutamassa suuressa keskitetyssä lämmöntuotantolaitoksessa tai lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksessa, lämpöä voidaan tuottaa pienemmillä lämpölaitoksilla ja lämpöverkossa voi olla lämmönkuluttajia, jotka myös tuottavat lämpöä itse.

Kesällä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa tuotetusta lämmöstä osa voi jäädä käyttämättä, sillä sähkön tuotto voi olla kannattavaa vaikka lämmöntarvetta ei olisi. Lisäksi useissa rakennuksissa on erityisesti kesällä jäähdytystarvetta. Myös erilaiset teollisuuslaitokset ja esimerkiksi datakeskukset tuottavat hukkalämpöä ympäri vuoden.

Asuin- ja liikerakennusten ja teollisuuden viilennystarve on perinteisesti hoidettu rakennuskohtaisilla kylmälaitteilla. Lämpöverkkoteknologiaa voidaan kuitenkin hyödyntää myös keskitettyyn viilennykseen. Tällöin ylimääräinen lämpö siirretään viileän kuluttajalta lämpöverkkoon. Verkoston avulla toteutettua viilennystä kutsutaan kaukokylmäksi.

Kaukokylmässä siis hukkalämpö voidaan siirtää lämmönsiirrinten avulla vesistöön tai ilmaan tai hyödyntää absorptiolämpöpumpun energianlähteenä viileän tuottamiseen. Kaukokylmäverkko on erillinen verkko kaukolämpöverkosta tai ns. lämpökylmäverkko. Kaukokylmäverkko voi muodostaa erityyppisiä keskitettyjä tai hajautettuja järjestelmiä. Eri järjestelmävaihtoehtoja on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Erityyppisiä jäähdytysjärjestelmiä, joissa jäähdytys perustuu kaukojäähdytykseen [54]

Keskitetysti jäähdytys voidaan tuottaa esimerkiksi kylmäkoneilla, kuten absorptiokylmäkoneella, tai kompressorikylmäkoneen avulla. Absorptiokylmäkone tai -lämpöpumppu voi käyttää primäärienergianlähteenään joko lämpöverkon lämpöä tai muun lämpöä tuottavan laitoksen lämpöä. Tällöin kylmä jaetaan rakennuksiin joko täysin erillisen kylmäverkon avulla tai yhdistetyn lämpö-kylmäverkon avulla. [54]

Jäähdytystä voidaan myös tuottaa hajautetusti kiinteistökohtaisilla absorptiokylmäkoneilla (ylimpänä vasemmalla kuvassa 18). Tällöin järjestelmä erottuu perinteisestä jäähdytysjärjestelmästä siten, että kiinteistökohtaiset absorptiokoneet hyödynnevät lämpöverkosta saatavaa lämpöä tai suoraan kyseisen kiinteistön hukkalämpöä kylmän tuottamiseen. [54]

## 4.2 Lämpötehon siirto lämpöverkossa

### 4.2.1 Tehonsiirtokyky

Lämpöverkon tehonsiirtokyky riippuu putkikoosta ja meno- ja paluuveden lämpötilaerosta. Kaukolämpöverkon tehonsiirtokyky  $\Phi_{verkko}$  voidaan melko hyvällä tarkkuudella laskea seuraavan approksimoidun yhtälön avulla:

$$\Phi_{verkko} = \dot{m} c_p \Delta T, \text{ jossa} \quad (5)$$

$\dot{m}$  on putken läpi kulkevan veden massavirta (kg/s),  
 $c_p$  on veden keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti (J/kg,K) lämpötila-alueella ja  
 $\Delta T$  on putken läpi kulkevan kuluttajalle menevän menoveden ja kuluttajalta palaavan paluuveden lämpötilojen erotus eli veden jäähtytys tai jäähtymä.

Putken läpi kulkevan massavirran suurimman mahdollisen arvon määrää putken poikkipinta-ala  $A$ , veden tiheys  $\rho$  ja putken suuntainen virtausnopeus  $w$  seuraavan yhteyden mukaan:

$$\dot{m} = \rho A w \quad (6)$$

Putken poikkipinta-ala  $A$  taas riippuu putken halkaisijasta  $D$ :

$$A = \pi \frac{1}{4} D^2$$

Nähdään, että verkon tehonsiirtokyky on suoraan verrannollinen massavirtaan, joka on suoraan verrannollinen poikkipinta-alaan, joka riippuu putken halkaisijan toisesta potenssista.

Mitä suurempi virtausnopeus  $w$  on, sitä suuremmat ovat virtauksen kitkاپainehäviöt putkessa ja kertavastushäviöt liitoskohdissa. Painehäviöistä kerrotaan tarkemmin luvussa 4.6.2.

Lämpöverkon mitoituksen suunnittelussa valitaan putkikoko putken kautta kulkevan arvioidun tehontarpeen mukaan siten, että huomioon otetaan maksimaalinen painehäviö putkessa ja meno- ja paluuputken lämpötilaero. Painehäviön maksimaaliselle arvolle suositellaan 1 bar/km runkoputkessa ja 2 bar/km pienemmissä liittymäputkissa [55]. Näiden perusteella voidaan valita putkidimensio tehdasvalmiista putkista käyttämällä hyväksi putkivalmistajien ilmoittamia painehäviökuvaajia.

Lämpöverkko on perinteisesti suunniteltu lähtien keskeisestä tuotantolaitoksesta kuluttajille päin. Alkuvaiheessa lämpöverkko on mitoitettu niiden kuluttajien kuluttaman lämmön mukaan, joiden tiedetään tai ennustetaan liittyvän verkkoon. Verkon laajentuessa lisähaarat mitoitetaan verkkoon liittyvien kuluttajien tarvitseman tehon mukaan tai ennustettujen tehotarpeiden mukaan. [53]

Hajautetun lämmöntuotannon lisääntyminen voi vaikuttaa verkon mitoituksen riittävyyteen. Mikäli rakennuskohtaiset lämmönlähteet tuottavat suuremman osuuden



lämmityksestä, pienenee lämmönsiirron tarve keskitetystä lämmöntuotantopaikasta ja verkon siirtokapasiteetin tarve vähenee. Toisaalta lisääntyvä säätämätön lämpöteho, joka ylittää kulutuksen paikallisesti lisätä lämpötehon siirtotarvetta.

#### 4.2.2 Tehohippujen tasoittuminen verkossa

Kun lämpöä käyttävät kiinteistöt eli käyttökohteet on liitetty toisiinsa lämpöverkolla, tehontarpeen vaihtelut tasoittuvat. Tämä johtuu siitä, että kulutushuiput eivät välttämättä ole samanaikaisia. Kulutushuippujen tasaantumista kutsutaan risteilyksi ja se johtuu pääasiassa käyttöveden kulutushuippujen eriaikaisuudesta. Satunnaisvaihtelut tasaantuvat sitä todennäköisemmin, mitä suurempi määrä käyttökohteita on kytketty samaan järjestelmään lämpöverkon avulla. Toisin sanoen koko järjestelmän suurin tehontarve on pienempi, kuin käyttökohteiden huipputehontarpeiden summa. [56]

Eräs tapa arvioida risteilyvaikutusta on risteilykerroin. Risteilykerroin  $r$  kuvaa erillisten kohteiden huipputehojen summan  $\sum_{i=1}^n \phi_i$ , ja koko verkon toteutuvan huipputehon  $\phi_{tot,max}$  suhdetta. [56]

$$r = \frac{\phi_{tot,max}}{\sum_{i=1}^n \phi_{i,max}} \quad (7)$$

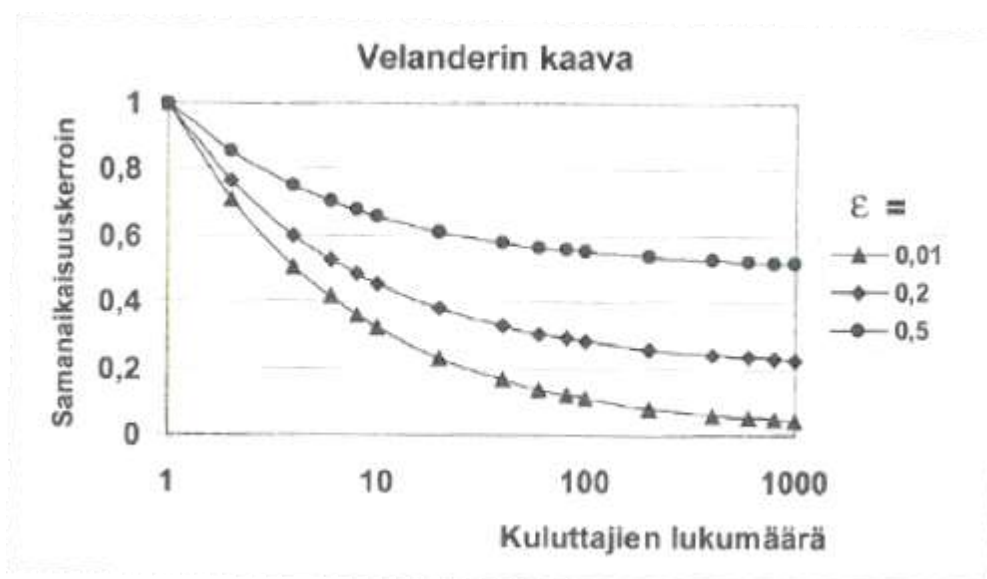
Risteilykerroin voidaan ennustaa laskennallisesti olettamalla, että lämmön kulutukset eri kiinteistöissä ovat toisistaan riippumattomia ja yhtäaikaisuuden todennäköisyys on normaalijakautunutta. Tällä oletuksella risteilykertoimelle voidaan määrittää laskennallinen yhtälö, ns. Velanderin yhtälö.

$$r = \varepsilon + (1 - \varepsilon)/\sqrt{n}, \quad (8)$$

jossa  $n$  = yksittäiskuluttajien määrä

$$\varepsilon = \text{tehokerroin} = \text{keskiteho/maksimiteho} = \phi_{i,keski}/\phi_{i,max}$$

Velanderin yhtälön avulla voidaan laskea risteilykertoimia eri tapauksille eli eri kuormituskertoimen ja yksittäiskuluttajien määriksi. Tällaisia laskettuja arvoja risteilykertoimelle on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Vanderlinin kaavalla laskettuja arvoja risteilykertoimelle eli samanaikaisuuskerroimelle.

Vanderlinin kaava siis antaisi Otaniemen 30 opetus- tutkimus- ja toimistokäytössä olevan rakennuksen risteilykertoimelle arvon 0,2...0,6. Otaniemen esimerkkikohteiden keskimääräinen tehokerroin  $\epsilon$  oli vuonna 2012 tehtyjen mittausten mukaan luokkaa 0,22. Tällöin Vanderlinin kaavan avulla ennustettu risteilykerroin olisi luokkaa 0,36.

Esimerkkikohteesta Otaniemestä on tarjolla tunnin tarkkuudella toteutunutta lämmön kulutusdataa. Tästä voidaan laskea risteilykerroin, mutta sitä ei voida suoraan verrata kirjallisuuden arvoihin.

Lämmön kulutusta on mitattu vuonna 2012 tunnin keskitehoina. Suurimmat hetkeliset kulutushuiput, jotka on otettava huomioon yksittäisen rakennuksen lämmitysjärjestelmän mitoituksessa, tasoittuvat tunnin ajanjaksoja tarkasteltaessa. Tästä syystä tunnin keskitehoista määritetty huipputeho on pienempi kuin hetkellisistä tehoista määritetty huipputeho.

Vuonna 2012 Otaniemen lämpöverkon todellinen tuntinen huipputeho oli 21,03 MW ja yksittäisten rakennusten tuntisten huipputehojen summa oli 23,60 MW. Tällöin vuonna 2012 toteutunut ”tuntinen” risteilykerroin ( $r$ ) Otaniemen lämpöverkossa olisi 0,89.

Tämä eroaa odotetusti merkittävästi Vanderlinin kaavan avulla ennustetusta risteilykertoimesta (n. 0,36). Yksi selitys on, että tunnin keskimääräisiä tehoja kuvaavat tehot tasoittavat jonkin verran todellisia piikkejä. Toinen syy Vanderlinin kaavan antamaan pieneen risteilykertoimeen löytyy oletuksesta, jonka mukaan lämmön ja lämpimän käyttöveden kulutus vaihtelisi satunnaisesti. Tutkituissa rakennuksissa näin ei kuitenkaan ole, vaan useissa rakennuksissa lämpimän veden käyttöajat ja lämmönkulutushuiput sattuvat samoihin aikoihin, sillä rakennusten käyttötarkoitukset ovat hyvin samankaltaiset.

Risteily, eli tehohuippujen eriaikaisuus on kuitenkin hyvin merkittävä etu. Risteily ilmiönä mahdollistaa alueen lämmitysjärjestelmän mitoittamisen pienemmäksi, kuin yksittäisten rakennusten yhteenlaskettu huipputehontarve vaatisi. Toisin sanoen esimerkiksi Otaniemen alueellinen lämmitysjärjestelmä voidaan lämpöverkon ansiosta mitoittaa ainakin n. 10 % pienemmäksi huipputeholtaan, kun risteilykerroin on 0,89. Tavallisesti kaukolämpöverkon mitoituksessa oletetaan risteilykerroin 0,7 [56].

### **4.3 Lämpöverkko ja hajautettu lämmöntuotanto kirjallisuudessa**

Lämpöverkon ja hajautetun lämmöntuotannon yhdistämistä tutkitaan ympäri maailmaa eri näkökulmista. Tutkimusta tehdään esimerkiksi Pohjoismaissa, muualla Euroopassa, Kiinassa, Japanissa, Yhdysvalloissa ja Kanadassa.

Teollisuuden hukkalämmönlähteiden hyödyntämistä kaukolämpöjärjestelmässä tutkitaan esimerkiksi Kiinassa. Hukkalämmön hyödyntämistä erityisesti matalalämpötilaisissa kaukolämpöverkoissa ovat tutkineet esimerkiksi Fang Hao et. al artikkelissaan Industrial waste heat utilization for low temperature district heating [42]. Heidän tutkimuksensa mukaan erityisesti Kiinassa on valtava potentiaali teollisuuden hukkalämmön laajalle hyödyntämiselle ja hukkalämmön hyödyntämisen edistämiseen pitäisi käyttää kokonaisvaltaista näkökulmaa.

Tanskan kaukolämpöalan ja yliopistojen yhteinen 4GDH-tutkimuskeskus taas tutkii kuinka vakiintunut kaukolämpöala voi vastata uusiin haasteisiin. Nykyisten kaukolämpöön liitettyjen rakennusten energiatehokkuusvaatimukset tiukkenevat ja Tanskalla on tavoite 100 % uusiutuviin lähteisiin perustuvasta energiantuotannosta. Toisaalta Tanskassa kunnat, jotka omistavat kaukolämpöverkon, voivat pakottaa talon liittymään kaukolämpöverkkoon, mikäli talo sijaitsee kunnan kaukolämpöverkon alueella [57]. Kuitenkin kaukolämpöalakin kohtaa kilpailua, sillä ihmiset jopa mm. ostavat itsensä ulos kaukolämpöverkosta ns. sopimuksenpurkumaksun hinnalla [57].

4 GDH -tutkimuskeskus puhuu nimensä mukaan 4. sukupolven kaukolämmöstä. Artikkel 4. sukupolven (4GDH) kaukolämmöstä [1] määrittelee käsitteen tarkoittamaan matalan lämpötilan kaukolämpöverkkoa. Tällainen verkko täydentää älykästä energiajärjestelmää, jossa lämpö- sähkö- ja kaasuverkot tukevat toisiaan. Artikkelissa From electricity smart grids to smart energy systems – A market operation based approach and understanding käsitelläänkin mahdollisuutta muuttaa ylijäämänsähkö, kuten aurinko- tai tuulisähkö lämmöksi ja hyödyntää tähän lämpöverkkoa ja lämpövarastoja [58].

Suomessa yliopistojen lisäksi erityisesti kaukolämpöalaa edustava energiateollisuus ja energiayhtiöt kuten Fortum ja Helsingin Energia tekevät tutkimusta hajautettujen lämmönlähteiden hyödyntämisestä kaukolämpöjärjestelmässä. Tutkimusta tehdään yhteistyössä yliopistojen, Valtion Tieteellisen Tutkimuskeskuksen ja konsulttitoimistojen kanssa.

Suomen tutkimuksessa hajautettua lämmöntuotantoa hyödyntävästä kaukolämmöstä käytetään termiä avoin tai älykäs kaukolämpöjärjestelmä. [45, 59, 60] Avoin lämpöverkko viittaa kuluttajien mahdollisuuteen syöttää lämpöä lämpöverkkoon ja saada siitä korvausta. Älykäs kaukolämpöjärjestelmä taas tarkoittaa hajautetun lämmöntuotannon ja kulutuksen älykästä hallintaa [45].

Rakennuskohtaisen hajautetun lämmöntuotannon lisääntymisen ja rakennusten energiatehokkuuden parantumisen vuoksi energiatiheys nykyisessä kaukolämpöverkossa pienenee Suomessa. Tämä aiheuttaa haasteen Suomessakin kaukolämmön kannattavuudelle.

Esimerkiksi tutkimushankkeessa ”Tulevaisuuden kaukolämpöasuinalueen energiaratkaisut” [61] tutkittiin tätä haastetta kaukolämpöverkon näkökulmasta. Tutkimus tehtiin kannattavuuslaskelman, kyselytutkimuksen ja simuloinnin avulla. Kannattavuuslaskelman perusteella kaukolämpö ei ollut edullisin lämmitysmuoto tutkitulla alueella. Edullisin oli sähkölämmitys yhdistettynä rakennuskohtaiseen aurinkovoimaan. Kaukolämmön kannattavuus myös heikentyisi, mikäli alueen talojen liityntäaste olisi heikko, sillä tämä lisäisi suhteellisia lämpöhäviöitä verkossa ja kasvattaisi kuluja suhteessa jaettuun lämpöön. Kyselytutkimuksen perusteella kaukolämpötoimijat näkevät kuitenkin tärkeänä, että tulevaisuudessa verkkoa kehitetään kevyemmäksi sopimaan paremmin energiatehokkaalle alueelle. [62]

Energiatoteellisuuden Pöyryllä teettämässä tutkimuksessa lämpöverkon keventämismahdollisuuksista taas todettiin, että kaukolämpöjärjestelmä voi olla kannattava lämmönmyyjän näkökulmasta myös pientalovaltaisella energiatehokkaalla alueella. Tämä edellyttää tutkimuksen mukaan sitä, että alueen lämpöverkko suunnitellaan mahdollisimman tarkoituksenmukaiseksi. [63]

Edellä esitellyt tutkimukset [62] ja [63] osoittavat, että tehdyt oletukset ja tutkittu alue vaikuttavat lopputuloksiin. Tutkimustuloksia onkin tulkittava varovasti ja otettava huomioon tutkimuksen lähtökohdat.

Hajautetun lämmöntuotannon vaikutusta lämpöverkkoon on Suomessa tutkittu jonkin verran. Esimerkiksi Fortum on teettänyt diplomityön aiheesta. Tässä diplomityössä simuloitiin aurinkolämmön lisäämisen vaikutuksia sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksen käyttöön. Simuloinnin tuloksena todettiin, että aurinkolämmön tuotto kesällä vähentää kaukolämpöveden virtaamaa ja kasvattaa paluuveden lämpötilaa, sillä lämmön kysyntä vähenee. Tällöin esimerkiksi lämpöakkujen avulla voitaisiin mahdollistaa yhteistuotantolaitoksen sähköntuotanto kesällä ja syöttää ylijäämälämpö niihin. [60]

Kirjallisuudessa on kuitenkin melko vähän kokoavaa tutkimusta hajautetun lämmöntuotannon näkökulmasta: miten lämpöverkko voi hyödyttää hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvaa järjestelmää ja mitä ominaisuuksia eri hajautetun lämmöntuotannon muodot vaativat lämpöverkolta. Tässä työssä pyritäänkin tutkimaan juuri hajautetun lämmöntuotannon näkökulmasta lämpöverkkoa.

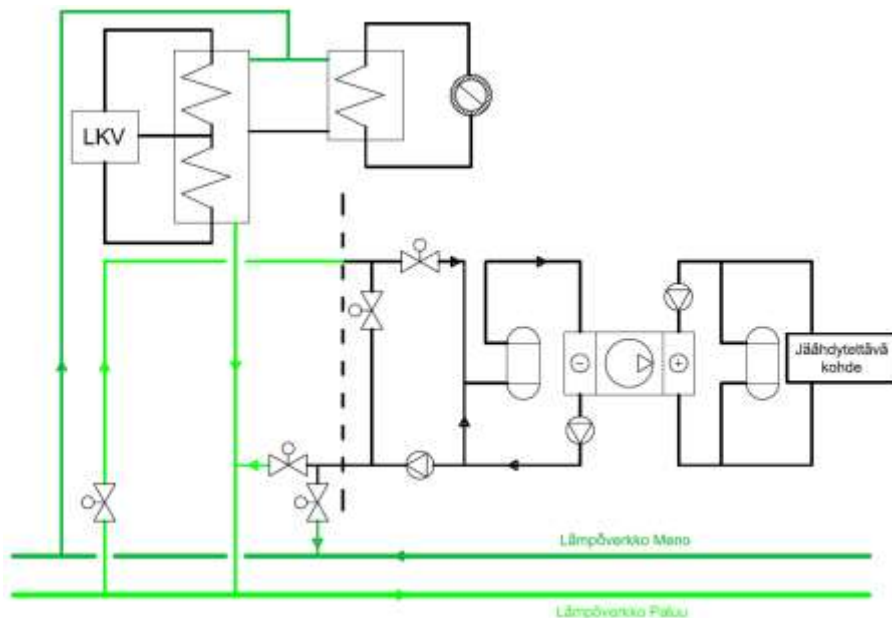
## 4.4 Hajautetun lämmöntuotannon ja rakennusten kytkeminen verkkoon

### 4.4.1 Hajautetun lämmöntuotannon kytkeminen verkkoon

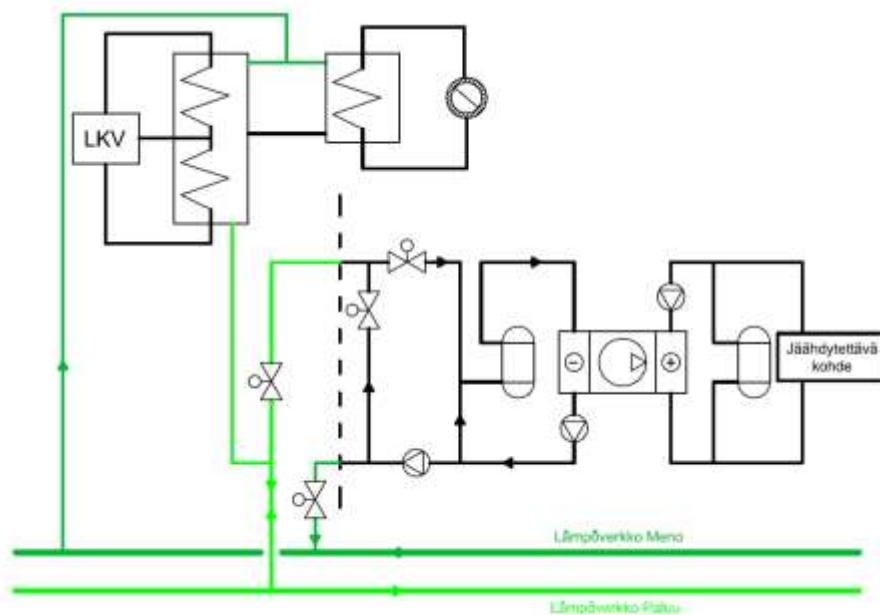
Hajautetun lämmöntuotannon kytkeminen lämpöverkkoon on mahdollista ja tarjolla on erilaisia vaihtoehtoja. Mikäli lämmöntuotannon tai hukkalämmön lämpötilataso on riittävä, lämpö voidaan syöttää lämpöverkon menoputkeen. Jos taas lämpötilataso ei ole riittävä, voidaan lämpötilatasoa nostaa lämpöpumpun avulla ja syöttää lämpö menoputkeen tai lämpö voidaan syöttää paluuputkeen.

Esimerkkikohteessa Espoon Otaniemessä toimiva lämpöyhtiö Fortum on teettänyt erilaisia kytkentämalleja lämpöasiakkaiden tuottaman lämmön ja hukkalämmön, kuten jäähdytyksen lauhduslämmön syöttämisestä lämpöverkkoon. Kytkenässä kaukolämpöverkon paluuvettä lämmitetään jäähdytyksen lauhduslämmöllä, ja lämpö siirretään kaukolämpöverkkoon.

Toiset kytkennöistä mahdollistavat lämmön syöttämisen vain lämpöverkon menoveteen, toiset sekä meno- että paluuveteen. Lämmönlähteen lämpötilasta riippuen lämmön siirtäminen menoveteen on mahdollista joko ympäri vuoden tai vain kesällä ja välikausina. Mikäli lämpötilataso on riittävän lähellä menoveden lämpötilatasoa, voidaan se syöttää menoveteen ja mikäli lämpötilataso on alempi, voidaan lämpö syöttää paluuveteen. Kytkenäesimerkki, joka mahdollistaa lämmön syötön vain menoveteen on esitetty kuvassa 21. Kytkenä, joka mahdollistaa veden syöttämisen meno- tai paluuveteen lämpötilasta riippuen on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Kytkenä, joka mahdollistaa matalamman lämpötilan lämmön, kuten jäähdytysjärjestelmästä tulevan hukkalämmön syötön meno- tai paluulinjaan menoveden lämpötilasta riippuen. Kytkenässä voi katkoviivasta oikealla olevan jäähdytysjärjestelmän sijaan olla muukin lämmönlähde, jossa lämpötilataso on vastaava, eli vähintään 65 °C. Lähde: Fortum Power and Heat Oy, Kaukolämpöselvitykset



Kuva 21. Kytentämalli, joka mahdollistaa hajautetun lämmönlähteen, kuten lämpöpumpun perustuvan jäähdytysjärjestelmän lauhdutuslämmön syöttämiseen vain menoveteen. Lähde: Fortum Power and Heat Oy, Kaukolämpöselvitykset

Sekä kuvan 20 että kuvan 21 kytkennöissä on hyödynnetty varaa- ja paluuvettä

Kuvissa 20 ja 21 oleviin kytkentöihin on vastaavasti mahdollista liittää viilennyksen lauhdutuslämmön sijaan muita lämmönlähteitä, kuten aurinkolämpöä, maalämpöä tai muita alueellisia tai paikallisia lämmönlähteitä. Tällöin sopiva kytkentätapa riippuu lämmönlähteen lämpötilatasosta ja lämpöverkon omistajan määrittämistä lämpötila- ja muista rajoituksista.

Lämpöverkon haltija ei kuitenkaan välttämättä halua paluuveteen siirrettyä lämpöä. Korkeampi paluuveteen lämpötila voi heikentää vastapainelaitoksen sähköntuotannon hyötysuhdetta ja lisätä lämpöhäviöitä verkossa.

Luvussa 4.4.2 käsitellään rakennuskohtaisten lämmönlähteiden kytkemistä verkkoon.

Tukholmassa Fortum on avannut kaukolämpömarkkinaa siten, että se ostaa asiakkaiden tuottamaa lämpöä kaukolämpöverkkoon (49). Energiantuotannon hyötysuhde asiakkaalle perustuu dynaamiseen kaukolämmön hintaan. Tällöin kuluttaja voi myydä verkkoon lämpöä, mikäli pystyy tarjoamaan lämmön dynaamisella hinnalla halvemmalla. (50)

Käytännössä Tukholman hinta muuttuu päivän tarkkuudella siten, että seuraavan päivän hinta julkaistaan edellisenä päivänä. Tukholmassa käytetty dynaaminen hintamalli perustuu sääennusteisiin. (51) Pyrkimyksenä hintamallin kehityksessä on ollut luoda yksinkertainen ja läpinäkyvä malli hinnan määrittämiseen.

Tukholmassa lämpöverkon menoveden lämpötila vaihtelee vuoden aikana talven 110-115 asteen ja kesän n. 80 asteen välillä. Paluuveden lämpötila Tukholmassa on luokkaa 40-50 astetta. Lämmöntuottaja-asiakkaat on kytketty verkkoon joko paluupuolelle tai menopuolelle tai kytkennällä, joka mahdollistaa molemmat vaihtoehdot menoveden lämpötilasta riippuen.

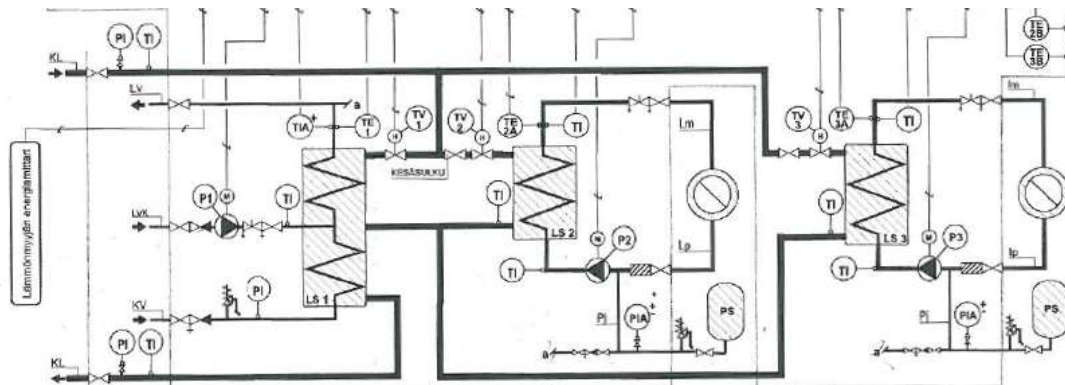
Mikäli lämpö syötetään paluupuolelle, se on vähemmän arvokasta, sillä paluuveden lämpötilan nousu huonontaa vastapainelaitoksen sähkön tuotannon isentrooppista hyötysuhdetta. Toisaalta lisääntynyt sähköntuotannon häviö saadaan talteen kaukolämpöön. (52) Paluuveteen kytketyn tuotannon huonompi arvo hyvitetään ostetun lämmön hinnassa ja kytkentä on Tukholmassa Fortumin verkossa kalliimpi asiakkaalle.

#### **4.4.2 Rakennusten kytkeminen verkkoon**

Rakennukset kytketään lämpöverkkoon joko suoraan tai epäsuorasti. Suora kytkentä tarkoittaa, että lämpöverkon vesi kiertää suoraan rakennuksen lämmitysjärjestelmässä, kuten patteriverkostossa. Epäsuora kytkentä taas tarkoittaa, että lämpöverkossa kiertävä vesi ei kierrä suoraan talon lämmitysjärjestelmässä, vaan lämpö siirretään lämmönsiirtimien kautta.

Perinteisesti kaukolämpö kytketään epäsuorasti rakennukseen käyttöveden lämmönsiirtimen, ilmanvaihdon lämmönsiirtimen ja lämmitysverkoston lämmönsiirtimen kautta kuten kuvassa 22. Ilmanvaihto ei välttämättä kaikissa rakennuksissa ole kytketty lämpöverkkoon.

Kuvassa 22 esitetyssä kaukolämmön peruskytkentä 1:ssä käyttöveden lämmönsiirtimelle ohjataan paluuvettä lämmitysverkostolta, jolloin kaukolämpöveden jäähdytys eli jäähtyminen lämmitysjärjestelmässä paranee. Tätä hyödynnetään suuremman kokoluokan rakennuksissa, joissa kytkennän ansiosta jäähdytyksen paraneminen on merkittävää, eli lämmityssiirtimeltä palaavan ensiöpuolen veden lämpötila on yli 45 astetta. [64]



Kuva 22. Kaukolämmön peruskyltensä 1. Tätä kyltensä käytetään kaikissa asuinrakennuksissa, joissa käyttövesiteho on yli 220 kW, uusissa asuinrakennuksissa joissa käyttövesiteho on yli 120 kW ja muissa kuin asuinrakennuksissa, mikäli rakennuksen lämmitys-siirtimeltä palaavan veden lämpötila on yli 45 astetta. [64]

Patteri- ym. verkon lämpötilan säätö tehdään useimmiten ulkolämpötilaan perustuen. Käytännössä tällöin säädetään patteriverkostossa ja lämmityksen lämmönsiir-timen läpi virtaavan nesteen virtaamaa säätöventtiilin avulla. [64]

### Rakennuskohtainen lämmöntuotanto

Kun käytössä on rakennuskohtaista hajautettua lämmöntuotantoa ja lämpöverkosta saatava lämpö, puhutaan hybridijärjestelmästä. Tällöin samassa lämmönjakokeskuk-suksessa on sekä lämmön tuoton kyltensä rakennukseen ja verkkoon että lämpö-verkon lämmön kyltensä rakennukseen, kuten kuvasta 23 nähdään. [65]



Kuva 23. Hybridijärjestelmässä lämmönjakokeskukseen lämpöä tulee rakennuskohtai-sesta lämmönlähteestä (hajautettu lämmöntuotanto) ja kaukolämpöverkosta. Lämpöä siirretään lämmönjakokeskuksesta lämmitykseen ja lämpimään käyttöveteen ja takaisin verkkoon.

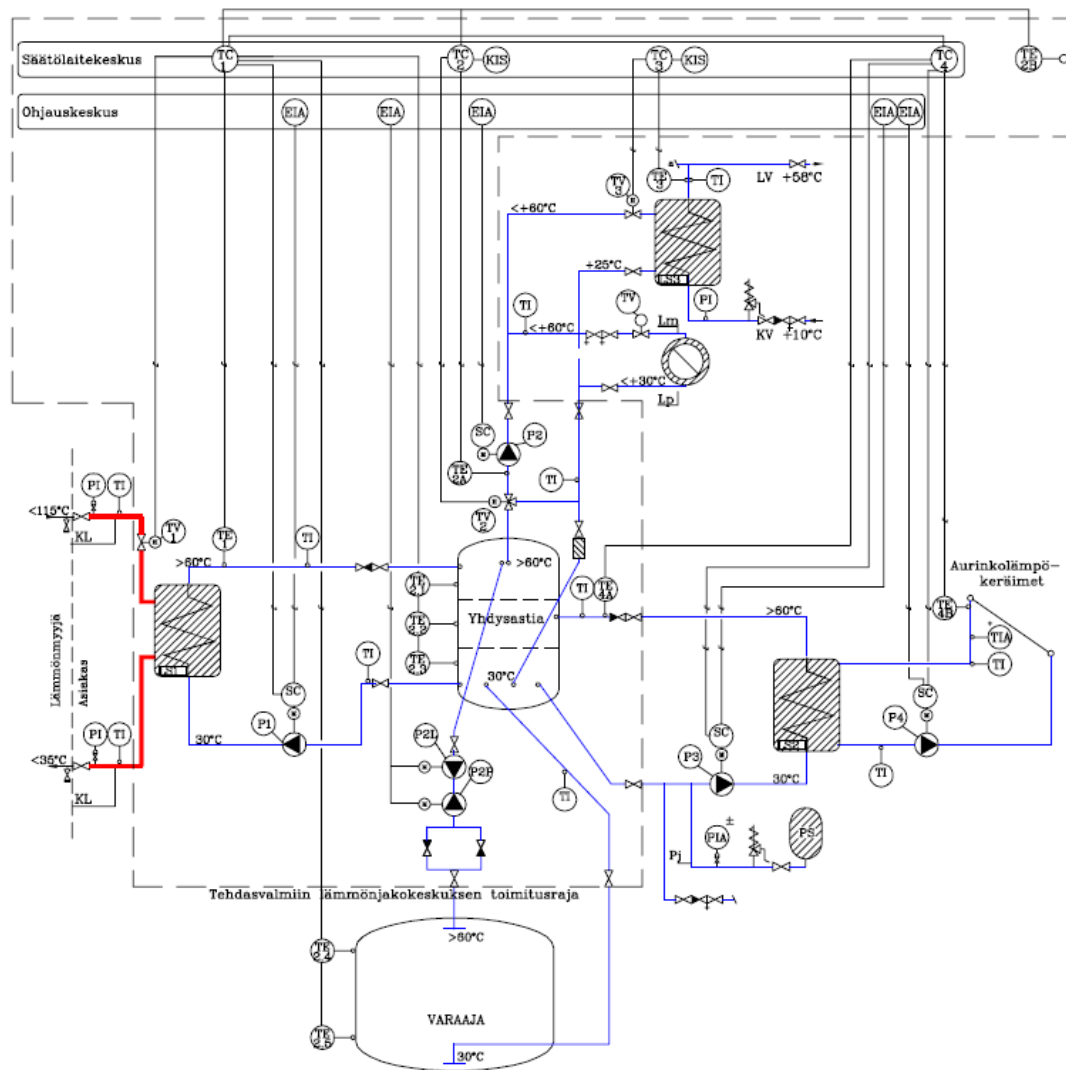
Hybridijärjestelmän kyltensä lämpökeskuksessa on erilaisia tapoja. Kun kauko-lämpöjärjestelmä ja rakennuskohtainen lämmitys yhdistetään lämpökeskuksessa, on järkevää käyttää lämpövaraajaa. Tämän varaajan käyttö voi hyödyttää koko läm-mitysjärjestelmää kokonaisuutena ja kaukolämpöjärjestelmää parantamalla kauko-lämpöveden jäähdytystä. [65]



Varaaja voidaan kytkeä järjestelmään siten, että se toimii koko järjestelmän yhteen liittäväenä yhdysastiana. Tällaisessa varaajakytkenässä kaikkiin lämmitysjärjestelmiin menevä vesi ja niistä palaava vesi kulkee yhdysastian kautta. Tällöin voidaan hyödyntää varaajasäiliön lämpötilan kerrostumista. Jokainen järjestelmä saa juuri oikean lämpöistä vettä ja viimeisenä lämpöverkon paluuveteen palaa viilein vesi. [65]

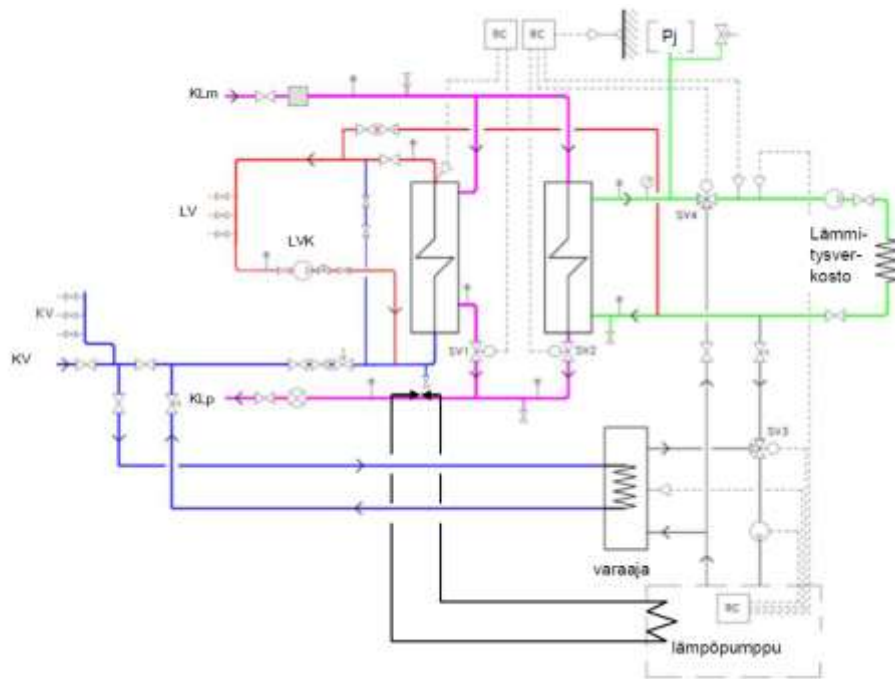
Jos lämpövaraaja kytketään ilmanvaihtolämmitykseen se voi tasata ilmanvaihtolämmitykselle ominaista tehontarpeen nopeaa vaihtelua ja leikata lyhytkestoisia tehopiikkejä. Jos rakennuksessa on käytössä erillinen matalamman lämpötilan kierto, esimerkiksi lattialämmityspiiri, saadaan piiriin syötettyä oikean lämpöistä vettä varaajassa tapahtuvan lämpötilan kerrostumisen ansiosta. [65]

Varaaja toimii tällöin koko järjestelmän yhdyssäiliönä. Yhdyssäiliö helpottaa eri lämmitysmuotojen säätöä, sillä eri lämmitysmuotojen tuottamat erilämpöiset veden kerrostuvat varaajassa. Varaaja tasaa myös aurinkokeräimistä saatavan lämpötehon vaihtelua. Lämpövaraajan käyttäminen on hyödyllistä myös, mikäli hybridijärjestelmän rakennuskohtainen lämmitysmuoto on maalämpö. Yhdyssäiliötä ja rakennuskohtaisia aurinkokeräimiä hyödyntävä kytkentäesimerkki on kuvassa 24. [65]

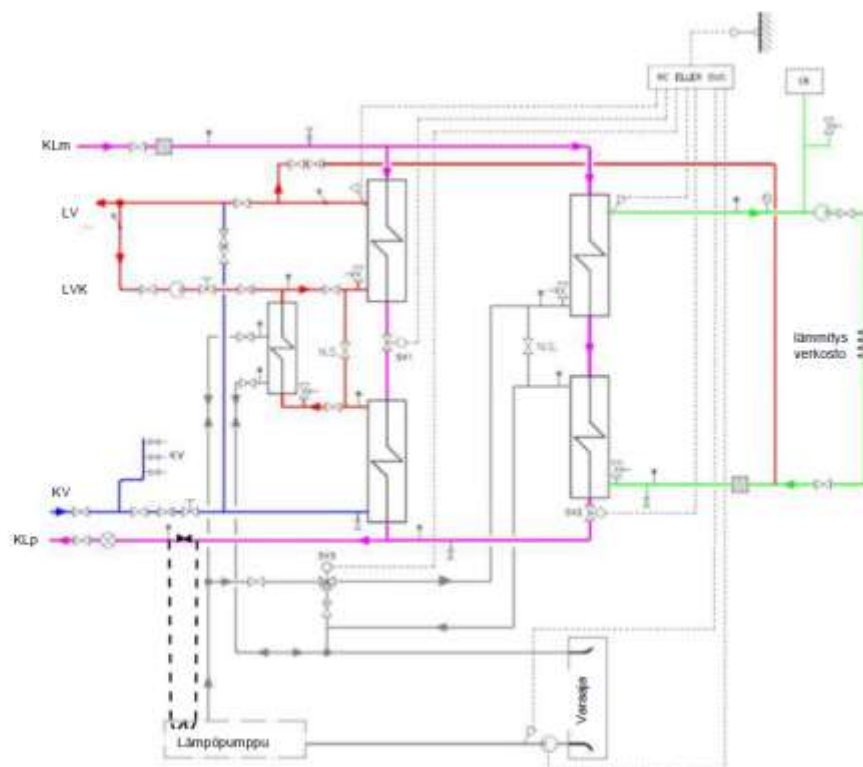


Kuva 24 Aurinkolämpöä hyödyntävän hybridijärjestelmän kytkentäkaavio. Kuva on Energiategollisuuden lämmönkäyttötoimikunnan teettämän selvityksen tuloksena esitetty esimerkkikaavio. Lähde: [65]

Maalämpö voidaan kytkeä joko kaukolämmön rinnalle (kuva 25) tai käyttää välisyöttökytkentää (kuva 26). Rakennuskohtainen maalämpöjärjestelmä yhdessä kaukolämmön kanssa voidaan rakentaa siten, että lämpöverkon paluuv veden avulla voidaan lämmitellä maalämpöpumpun höyrystimen vettä ja siten parantaa lämpöpumpun tehokkuutta kuvaavaa COP-arvoa. [65]



Kuva 25. Lämmönjakokeskus, jossa on maalämmön rinnankytkentä kaukolämmön kanssa. Tässä kytkennässä myös mahdollisuus esilämmittää lämpöpumpussa kiertävää nestettä kaukolämmön paluuveden avulla. Lähde: [65]

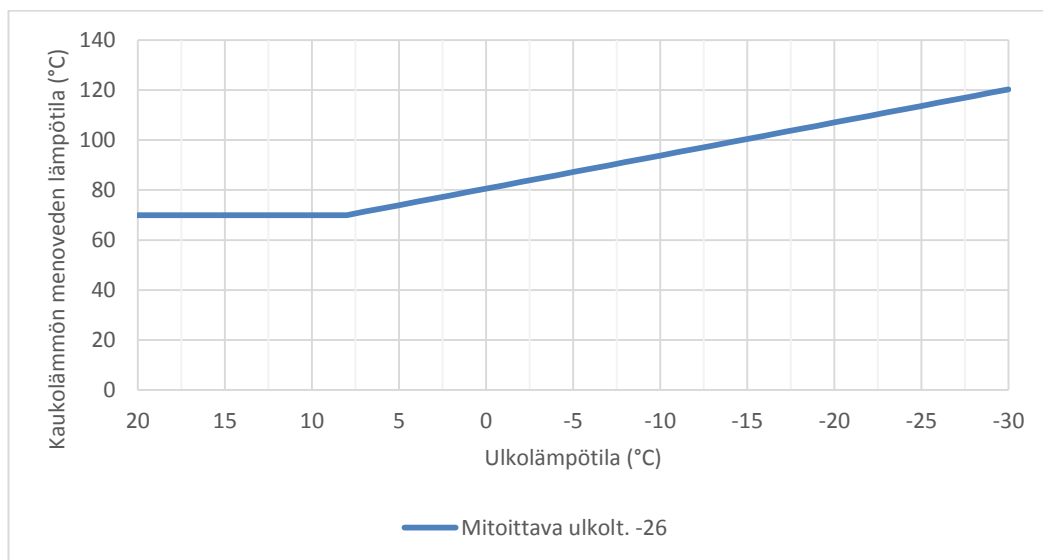


Kuva 26. Lämmönjakokeskus, jossa rakennuskohtaisen maalämmön välisyöttökytkentä, joka hyödyntää lämmönvaraaajaa. Kytkennässä on mahdollisuus myös lämpöpumpussa kiertävän veden esilämmitykseen kaukolämmön paluuveden avulla. Lähde: [65]

## 4.5 Lämpötilataso lämpöverkossa

Meno- ja paluuveden lämpötilataso on lämpöverkon keskeinen parametri ja vaikuttaa lämpöverkon kaikkiin osiin ja niiden suunnitteluun. Lämpötilataso vaikuttaa putkien mitoitukseen, hajautetun ja perinteisen lämmöntuotannon energiatehokkuuteen, lämpöhäviöihin putkessa ja lämmön siirtoon kuluttajien lämmönjakolaitteissa. [66]

Kaukolämpöverkkoon kytketty lämmönjakokeskus mitoitetaan yleisesti Suomessa kaukolämmön menoveden lämpötilan perusteella. Lämmönmyyjä lupaa lämmön tietyssä ulkolämpötilasta riippuvassa lämpötilassa. Tämä luvattu menoveden lämpötila on paikkakunta- yhtiö- ja aluekohtainen, mutta mikäli tarkkaa tietoa ei ole saatavissa, menoveden lämpötila-arviona voidaan käyttää kuvan 27 mukaista käyrää (lämmitysvyöhykkeellä I eli Etelä-Suomessa, jossa mitoittava ulkolämpötila on  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):



Kuva 27. Tavallinen kaukolämmön menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona Suomessa, kun mitoittava ulkolämpötila on  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lähde: [64]

Suomessa esimerkiksi Fortum on teettänyt tutkimusta nykyisten asiakkaidensa kaukolämmön lämpötilatarpeesta. Menoveden lämpötilaa voidaan Fortumin teettämien laskelmien mukaan alentaa jopa 63-68 asteeseen. [67]

Tanskan kaukolämpöverkon lämpötilataso on matalampi kuin Suomessa. Tällä hetkellä kaukolämpöverkon menolämpötila on n. 70-80 astetta ja paluulämpötila on n. 40 astetta. Kaukolämpöverkon lämpötilojen laskemista on suunniteltu entisestään. [68] Lämpötilan laskumahdollisuuksia tutkivan projektin 4DH projektiraportissa, todetaan, että lämpötilaa olisi mahdollista laskea aina 55/25 asteeseen (meno-/paluulämpötila), erityisesti niillä alueilla, joilla on paljon uudisrakentamista. [69]

Lämpötilatason alentaminen nykyisestä on hajautetun lämmöntuotannon ja energiatehokkuuden kannalta perusteltua. Kuitenkin lämpötilatason laskua rajoittavat useat tekijät. Nykyisten rakennusten riittävä lämmönsaanti, verkon tehonsiirtokyky

matalammassa lämpötilassa, painehäviöiden kasvu virtausnopeuksen kasvun seurauksena ja käyttöveden minimilämpötila legionellariskin vuoksi ovat tärkeimmät rajoittavat tekijät. Seuraavaksi edellä mainittuja lämpötilatason vaikutuksia tarkastellaan eri näkökulmista.

#### 4.5.1 Vaikutus hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämiseen

Aurinkolämmön ja lämpöpumppujen lämmöntuotannon hyötysuhde on sitä parempi, mitä alhaisemmassa lämpötilassa lämpö voidaan hyödyntää. Samoin hukkalämmön hyödyntäminen on paremmin mahdollista, mikäli tarvittava lämpötila on alempi.

Vaikka lämmönlähteen lämpötilataso olisi matalampi lämpöverkon menoveden lämpötilatasoon verrattuna, voi lämmön siirto lämpöverkon avulla olla mahdollista. Kuten luvussa 4.3 on kerrottu, lämmöntuotanto voidaan kytkeä sekä paluu- että menoputkeen. Rakennuskohtaisissa järjestelmissä voidaan myös käyttää lämpövarajaa yhdyssäiliönä, johon syötetään eri lämpötilaiset vedet ja ne kerrostuvat lämpötilatason mukaan. Tällöin rakennuksen matalampaa lämpötilatasoa vaativat järjestelmät voivat hyödyntää tätä lämpöä, tai se siirtyy paluuputkeen. Matalamman lämpötilatason omaava lämpö voidaan kytkeä myös lämpöpumpun kautta, jolloin lämpöpumppu nostaa lämmön riittävälle tasolle.

Vaikka vaihtoehtoisia tapoja matalamman lämmönlähteen kytkemiseen on, on suora kytkentä lämpöverkon menoveteen yksinkertaisin ja optimaalinen. Toisin sanoen lämpöverkon lämpötilan lämmönlähdettä korkeampi taso vaikeuttaa hajautetun lämmöntuotannon hyödynnettävyyttä, mutta ei välttämättä estä sitä.

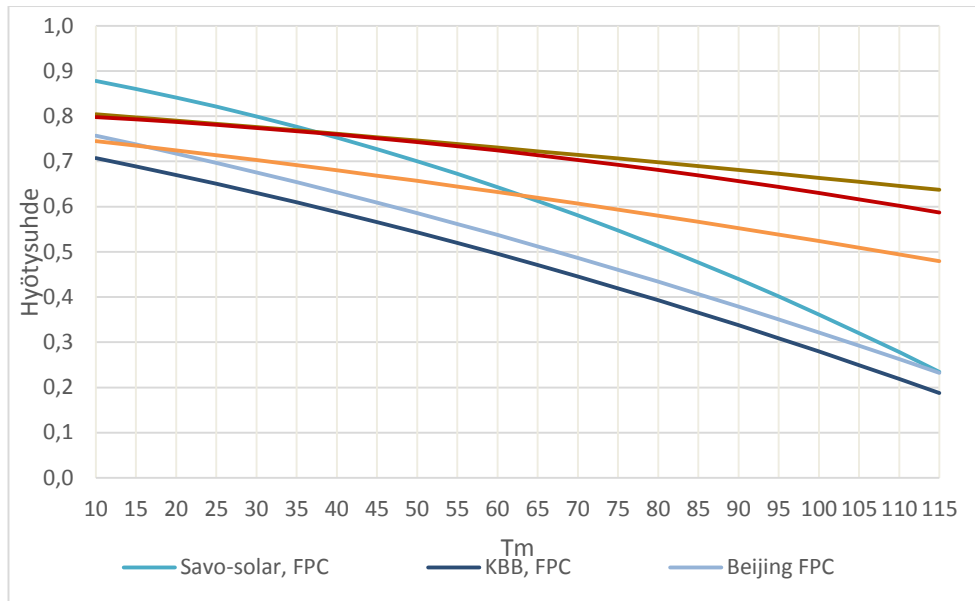
#### Aurinkolämmön hyödyntäminen

Aurinkokeräinten tuotto riippuu tavoitellusta lämpötilatasosta. Kuten luvun 2.2 taulukosta 2 nähdään, voi staattisista aurinkokeräimistä saadun lämmön lämpötila vaihdella paljonkin. Aurinkokeräimen hyötysuhde riippuu voimakkaasti aurinkokeräimestä tulevan nesteen lämpötilasta. Aurinkokeräimen lämpötilatason vaikutusta keräimen hyötysuhteeseen voidaan arvioida yleisesti käytetyn approksimatiivisen Hottel-Whillier-Bliss -yhtälön (9) avulla: [70, 71]

$$\eta_c = \eta_0 - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (9)$$

Yhtälössä (9)  $\eta_0$  on hyötysuhteen vakiotermi,  $a_1$  ja  $a_2$  ovat 1. ja 2. asteen kertoimet,  $G$  säteilyn intensiteetti,  $T_m$  keräinnesteen lämpötila ja  $T_a$  ympäristön lämpötila.

Kuvassa 28 on esitetty yhteyden (9) avulla laskettuna eräiden todellisten kaupallisessa käytössä olevien tasokeräinten ja tyhjiöputkikeräinten hyötysuhteita kiertoveden lämpötilan funktiona säteilyn intensiteetillä  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  olettamalla vakio ulkolämpötila. Keräinkohtaiset arvot  $a_1$  ja  $a_2$  on saatu aurinkokeräimiä sertifioivan The Solar Keymarkin julkaisemista sertifikaateista. [72]



Kuva 28. Eräiden kaupallisessa käytössä olevien tasokeräin- (FPC) ja tyhjiöputkikeräinten (EPC) hyötysuhde kiertoveden lämpötilan funktiona. Keräintietojen lähde:

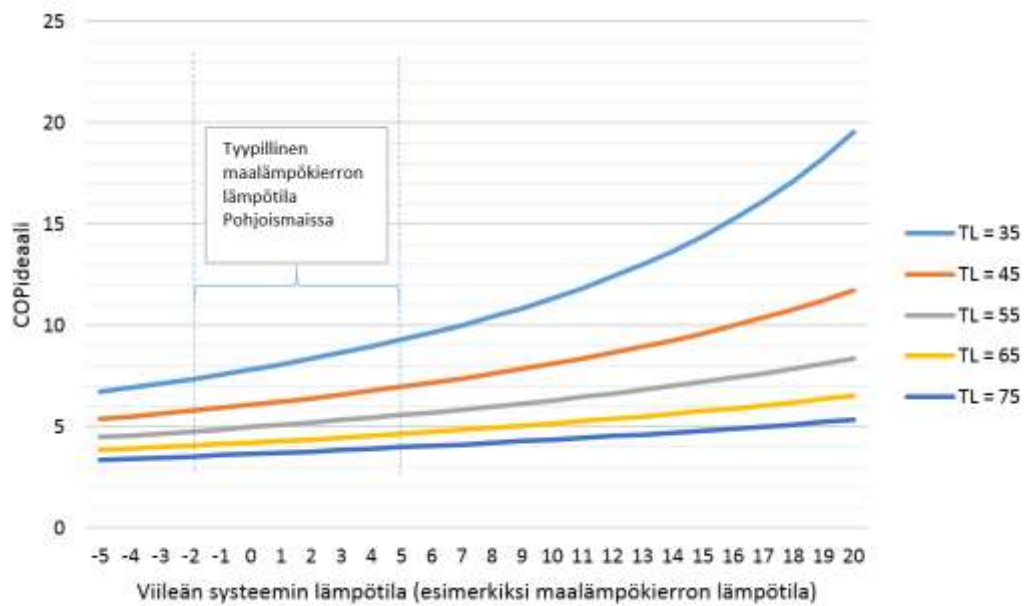
Kuvasta 28 nähdään, että mikäli keräimeen menevän veden lämpötila pysyy vakiona, keräimestä ulostulevan veden lämpötilan nosto laskee hyötysuhdetta. Nähdään myös, että tyhjiöputkikeräimille hyötysuhteen lasku kiertoveden lämpötilan nousun johdosta ei ole yhtä jyrkkää kuin tasokeräimille. Tämä johtuu siitä, että tyhjiöputkien konvektiiviset lämpöhäviöt ovat pienemmät kuin tasokeräinten, sillä tyhjiöputki vähentää näitä häviöitä.

### Maalämmön hyödyntäminen

Kuten luvussa 2.4 on esitetty, maalämpö perustuu maalämpöpumppuun, joka on lämpövoimakone. Lämpövoimakoneen ideaaliprosessin mukaan muuntokerroin COP:lle voidaan johtaa luvussa 2.4 esitetty yhteys:

$$\text{COP}_{\text{ideaali}} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_L - Q_K} = \frac{T_L}{T_L - T_K} \quad (10)$$

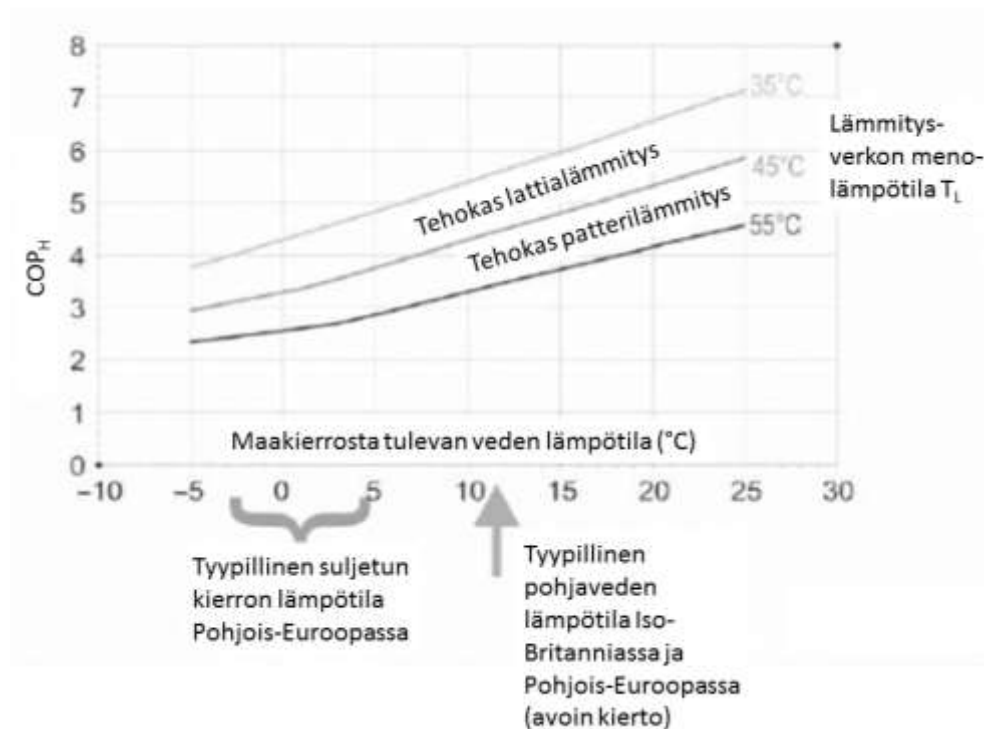
Yhteydestä (10) nähdään, että kylmemmän ja lämpimämmän systeemin lämpötilat  $T_K$  ja  $T_L$  vaikuttavat teoreettiseen maksimaaliseen muuntosuhteeseen. Mitä pienempi on lämpötilaero kylmemmän ja lämpimämmän systeemin välillä, sitä parempi on paras mahdollinen saavutettavissa oleva COP. Ideaaleja muuntosuhteita kylmän systeemin lämpötilan funktiona eri tavoitelämpötiloille on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Lämpöpumpun ideaali muuntosuhde COP on esitetty viileän systeemin lämpötilan (esim. maan alla kiertoputkessa kulkeneen veden) funktiona, eri tavoitelämpötiloille (esim. patterin menoveden lämpötila). Arvot on laskettu yhteyden (10 perusteella).

Kuvasta 29 nähdään, että tavoitelämpötila vaikuttaa voimakkaasti lämpöpumpun tehokkuuteen. Mitä suuremmalle lämpötilatasolle lämpö täytyy ”nostaa” sitä enemmän työtä lämpöpumpun on tehtävä suhteessa siirrettyyn lämpömäärään eli sitä huonompi on COP -arvo. Lisäksi nähdään, että kylmästä systeemistä saadun lämmön lämpötilataso vaikuttaa jonkin verran COP-arvoon.

Häviöt lämpöpumpussa ovat kuitenkin huomattavat, ja todellisessa systeemissä COP arvot ovat ideaalitulannetta pienempiä, mutta COP-käyrät ovat ideaalitulannetta vastaavan muotoisia. Erään todellisen esimerkkimaalämpöpumpun COP -arvoja kylmemmän lämpötilan (maan kautta kiertänyt vesi) funktiona on esitetty kuvassa 30. Kuvassa on käyrä kolmelle eri tavoitelämpötilalle eli lämmitysverkon menolämpötilalle. [37]



Kuva 30. Erään todellisen maalämpöpumpun COP-käyrät. Lähde: [37]

Maalämpöjärjestelmää ja lämpöverkkoon syöttöä suunniteltaessa onkin tärkeää ottaa huomioon, että maalämpöpumpun kannalta tehokkainta on jakaa lämpö matalassa lämpötilassa.

#### 4.5.2 Vaikutus lämpövarastoihin

Hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvan järjestelmän kannalta olennaista on mahdollisuus lämmön varastointiin. Ominaislämpökapasiteettiin perustuvien lämmön varastointimuotojen lämpöhäviöt ovat pienemmät, mikäli lämpö varastoidaan alemmassa lämpötilassa, kuten luvussa 3.2.4 on kerrottu.

Toisaalta matalamman lämpötilatason omaava varasto tarvitsee enemmän tilaa saman lämpöenergiämäärän varastoimiseen, kuin korkeamman lämpötilan varasto.

#### 4.5.3 Vaikutus lämpöhäviöihin verkossa

Kuten luvussa 4.6.1 on todettu, lämpöhäviöt lämpöverkosta ovat suoraan verrannolliset meno- ja paluuveden ja maan lämpötilaeroon yhteyden (14) mukaan  $\phi'_{tot} = 2(K_1 - K_2) \left[ \frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right]$  ja jos tarkastellaan samaa putkistoa eri lämpötiloissa, saadaan suhteelliseksi eroksi eri lämpötiloissa:

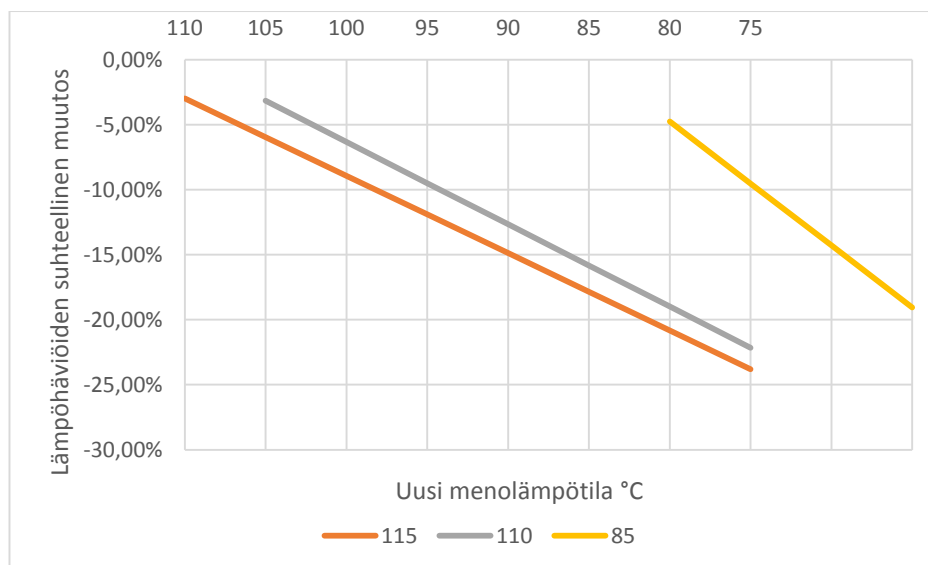
$$\frac{\phi'_{totA}}{\phi'_{totB}} = \frac{2(K_1 - K_2) \left[ \frac{(T_{mA} + T_{pA}) - 2T_g}{2} \right]}{2(K_1 - K_2) \left[ \frac{(T_{mB} + T_{pB}) - 2T_g}{2} \right]} = \frac{T_{mA} + T_{pA} - 2T_g}{T_{mB} + T_{pB} - 2T_g} \quad (11)$$



Yhteydessä (11) päädytään samaan tulokseen, kuin Kauppa- ja teollisuusministeriön Lämpölaitosyhdistyksellä teettämässä julkaisussa Kaukolämpöverkon käyttölämpötilan alentamismahdollisuudet [51] on johdettu. Tämä yhteys sisältää kyllä yksinkertaistavia oletuksia lämpöhäviömekanismista, mutta sen avulla voidaan tarkastella kuitenkin riittävällä tarkkuudella erityisesti lämpötilatason muutoksen vaikutusta lämpöhäviöihin.

Tällöin voidaan laskea lämpöhäviön muutos olettaen, että menoveden lämpötilan pudotus ei muuta paluuveden lämpötilaa. Tämä oletus on perusteltu esimerkiksi Helsingin kaupungin energialaitoksen vuonna 1985 tekemän tutkimuksen mukaan, johon on viitattu Lämpölaitosyhdistyksen tekemässä selvityksessä [51]. Tutkimuksessa todettiin, että ennen vuotta 1975 rakennetuissa taloissa 10 asteen menoveden lämpötilan nosto laskee paluuveden lämpötilaa 2 asteella. Vastaavasti tätä uudemmissa rakennuksissa suunta on päinvastainen, eli menoveden lämpötilan nousu 10 asteella nostaa paluuveden lämpötilaa 0...2 asteella. Voidaan siis olettaa, että keskimäärin muutos paluuveden lämpötilassa on likimain 0.

Jos esimerkiksi menoveden lämpötila  $T_m = 85\text{ °C}$ ,  $T_p = 40\text{ °C}$  ja maan lämpötila verkoston sijaintisyvytydessä  $5\text{ °C}$ , menoveden lämpötilan muutos  $85\text{ °C}$ :sta  $75\text{ °C}$ :een vähentää verkoston lämpöhäviöitä 8,7 %. Vastaavasti on laskettu myös suhteelliset lämpöhäviön muutokset menovedelle 115 asteessa (maan lämpötila 1 astetta) ja 110 asteessa (maan lämpötila 1 astetta). Tulokset on esitetty kuvassa 31 erotusprosenttina alkuperäisestä tilanteesta.



Kuva 31. Lämpöhäviöiden suhteellinen muutos uuden menoveden lämpötilan funktiona kolmella eri alkuperäisellä menoveden lämpötilalla.

Yleisesti kaikissa lämpöverkoissa lämpötilatason laskun etu on, että verkossa lämpöhäviöt pienenevät, mikäli veden lämpötilaa alennetaan. Voidaan siis todeta, että lämpöverkon lämpötilatasolla on suuri merkitys myös hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvan lämpöverkkoa hyödyntävän järjestelmän kannattavuuteen.

#### 4.5.4 Vaikutus kuluttajan lämmönsaantiin

##### Lämmitys

Vanhoissa, lämpöverkkoon kytketyissä rakennuksissa lämmityksen lämmönsiirtimien toisiolämpötila, eli patteriverkostoon menevä lämpötila on mitoitusulkolämpötilassa rakennuksen iästä riippuen vanhimmissa rakennuksissa 90/70 (meno/paluu) tai 70/40 astetta [51]. Uudisrakennusten toisiolämpötilan mitoitus suositus on 45/30 astetta ja poikkeustapauksissa 60/30 astetta. [55]

Lämmönsiirtimen teho saadaan laskettua kaavalla (12):

$$\dot{Q} = kA\Delta t_{ln}, \quad (12)$$

Kaavassa (12)  $k$  on lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin,  $A$  siirtimen pinta-ala ja  $\Delta t_{ln}$  on lämmönsiirtimen logaritminen lämpötilaero, joka riippuu ensiö- ja toisiopuolen meno- ja paluulämpötiloista ja niiden erosta [51].

Jos lämpöverkosta tulevan veden eli ensiöpuolen veden lämpötilaa alennetaan, pienenee logaritminen lämpötilaero lämmönsiirtimessä ja tämä pienentää lämmönsiirtimen siirtämää lämpötehoa [73].

Lämmönsiirtimet on kuitenkin yleensä mitoitettu väljästi. Tällöin ne kykenevät siirtämään tarvittavan lämpötehon ensiöpuolen lämmön alenemisesta huolimatta. Jos taas lämmönsiirtimet on mitoitettu todellisen huipputehon perusteella, on alennettua ensiöpuolen lämpötilaa kompensoitava [51].

Ensiöpuolen lämpötilan kompensointi voidaan tehdä joko ensiö- tai toisiopuolen virtaamaa kasvattamalla, jolloin lämmönsiirtokerroin  $k$  paranee. Jos virtaamaa ei voida kasvattaa riittävästi voidaan lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinta-alaa kasvattaa. Virtaaman kasvattaminen kasvattaa myös painehäviöitä lämmitysjärjestelmässä. Tällöin painehäviö rajoittaa toisiopuolen virtaaman kasvattamismahdollisuutta ja on kasvatettava lämpöverkon virtaamaa. [51]

##### Käyttövesi

Lämpimän käyttöveden minimilämpötila on Suomen rakentamismääräyskokoelman D1 mukaan 55 astetta. [74] Energiatieteiden ja teknologian tutkimuskeskuksen julkaisun K1/2013 mukaan tämän takaamiseksi käyttöveden lämmönsiirtimen toisiolämpötilan on minimissään oltava 58 astetta. [55]

Lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimiä koskevat samat lainalaisuudet kuin lämmityksen lämmönsiirtimiäkin. Käyttöveden vaatima lämpötilataso vain on korkeampi, kuin uudisrakennusten lämmityksen lämmönsiirtimien suositeltu toisiolämpötila. Lisäksi käyttöveden lämpötilatasovaatimus ei riipu vuodenajasta.

Mikäli lämpimän käyttöveden vaatima lämpötilataso on määräävä mitoitusperuste ja rajoittaa verkon menoveden lämpötilan alentamismahdollisuuksia, voidaan käyttöveden lämpötilaa myös priimata jollakin toisella lämmönlähteellä. Tällöin vain

osa lämmöntarpeesta joudutaan kattamaan korkeamman lämpötilatason lämmönlähteellä.

#### **4.5.5 Vaikutus painehäviöihin verkossa**

Kuten luvussa 4.2 on esitetty, lämpöverkon tehonsiirtokyky on suoraan verrannollinen verkon meno- ja paluulämpötilojen lämpötilaeroon. Tällöin verkon menolämpötilan pudotus pienentää tätä lämpötilaeroa, sillä menoveden lämpötilan alenema ei laske paluuv veden lämpötilaa vastaavan verran, vaan enimmillään n. 20 % menoveden lämpötilan laskusta. Menoveden lämpötilan laskeminen saattaa jopa nostaa paluuv veden lämpötilaa. [51]

Menolämpötilan laskua ja alentunutta paluu- ja menoveden lämpötilaeroa voidaan kompensoida veden virtausnopeuden kasvattamisella. Tämä kuitenkin kasvattaa painehäviöitä verkossa ja lisää pumppauskustannuksia. [53]

Affiniteettisääntöjen mukaan painehäviön muutos verkossa on suoraan verrannollinen tilavuusvirran muutoksen neliöön. Mikäli pumpun hyötysuhde pysyy samana, on pumpun tehontarpeen muutos verrannollinen tilavuusvirran muutoksen kuutiioon. [51]

Jos paluulämpötila ei muutu, menoveden lämpötilan tiputtaminen talven 110 °C:esta 100 °C:een vaatisi tilavuusvirran kasvattamista n. 25%. Tällöin affiniteettisääntöjen perusteella painehäviö verkossa kasvaisi n. 56% ja pumppausteho n. 95%. Vastaavasti välikaudella menoveden lämpötilan alentaminen 85 °C:esta 75 °C:een vaatii 40 % enemmän vesivirtaa, aiheuttaa 96 % suuremmat painehäviöt ja vaatii 174 % enemmän pumppaustehoa. [51] 10 asteen pudotuksen vaikutus painehäviöihin verkossa on suhteellisesti suurempi matalammalla lämpötilatasolla, sillä vaikutus siirtyvään lämpötehoon on suhteessa suurempi, kuin korkeammalla lämpötilatasolla.

Toisaalta menolämpötilan lasku kasvattaa vastapainelaitoksen sähköntuotantoa, jolloin pumppaukseen kuluva sähkö määrä voidaan mahdollisesti kattaa saatavalla sähkötehon lisäyksellä.

#### **4.5.6 Vaikutus lämpöverkon mitoitukseen**

Lämpötilaeron pientyminen siis pienentää olemassa olevan verkon tehonsiirtokykyä. Tätä voidaan kompensoida kasvattamalla tilavuusvirtaa, kuten luvussa 4.5.5 on esitetty. Mikäli tilavuusvirran kasvun aiheuttama painehäviön kasvu on liian suuri, voidaan joutua kasvattamaan lämpöverkon putkikokoa.

Putkikoot ilmoitetaan putken halkaisijana. Koska verkon tehonsiirtokyky riippuu virtausputken poikkipinta-alasta, on tehonsiirtokyky verrannollinen virtausputken halkaisijan neliöön.

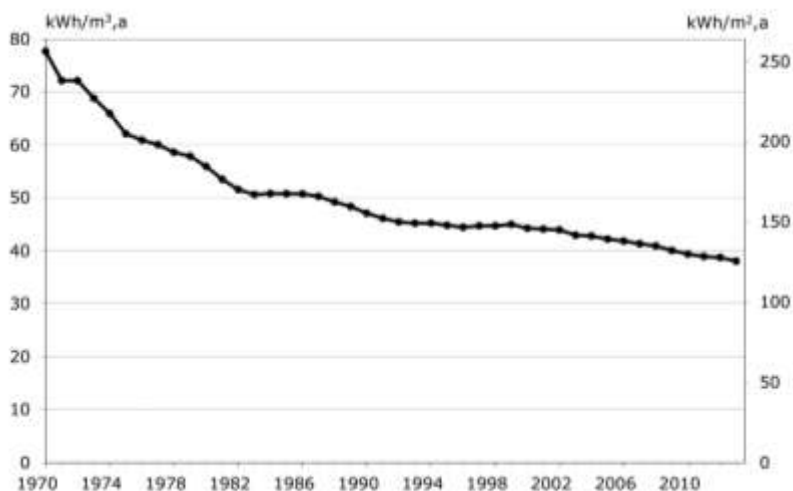
Lämpöverkon mitoituksen suunnittelussa valitaan putkikoko putken kautta kulkevan arvioidun tehontarpeen mukaan siten, että huomioon otetaan maksimaalinen

painehäviö putkessa ja meno- ja paluuputken lämpötilaero. Painehäviön maksimaaliselle arvolle suositellaan 2 bar/km runkoputkessa ja 4 bar/km pienemmissä liittymäputkissa [55]. Näiden perusteella voidaan valita putkidimensio tehdasvalmiista putkista käyttämällä hyväksi putkivalmistajien ilmoittamia painehäviökuvaajia.

Esimerkiksi erään lämpöputkivalmistajan ilmoittaman painehäviökuvaajan perusteella (liite 1) jos tarvittava teho on 100 kW ja lämpötilaero pudotetaan 50 °C:esta 40 °C:een, joudutaan valitsemaan seuraavaksi suurempi putkikoko, toisaalta tämä putkikoko riittää myös, mikäli lämpötilaero tippuu 30 asteeseen.

Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa on simuloitu erilaisten alueiden lämmöntarpeen kattamista kaukolämmön avulla. Kaukolämpöverkkojen lämpötilatason vaikutusta verkon kustannuksiin tutkittiin vertailemalla kolmea eri lämpötilatasoa, 120/70 (meno/paluu), 90/40 ja 60/30. Tutkimuksen tuloksien perusteella investointikustannukset eivät poikenneet paljoakaan korkeamman ja keskikorkean lämpötilatason välillä. Tämä indikoi, että keskikorkean lämpötilatason vaatima putkidimension kasvattaminen ei ole merkittävä. Sen sijaan suuremmat erot näkyivät keskikorkean ja matalan lämpötilatason verkkoja vertailtaessa. [66]

Usein verkon ylimitoitusta voidaan hyödyntää menolämpötilan alentamiseen. Käytännössä lämpöverkko suunnitellaan ottaen huomioon tulevat lämmöntarpeet ja uusien kuluttajien liittyminen. [53] Toisaalta nykyisten lämpöverkkojen alueella olevien asiakkaiden tehontarve on pienentynyt [75] (kuva 32) ja rakennusten lämpötehontarpeen ennustetaan pienenevän tulevaisuudessa energiatehokkuusparannusten ansiosta. Tällöin verkko voi olla lämmönsiirtokyvyltään suurempi, kuin on tarpeen. Tehonsiirtokyky olemassa olevan verkon alueella on siis tutkittava tapauskohtaisesti, mikäli menoveden lämpötilaa lasketaan.



Kuva 32. Kaukolämmitettyjen rakennusten ominaiskulutuksen kehitys. Lähde: [75]

Kun meno- ja paluulämpötilojen eroa tiputetaan, on erikseen kussakin verkostossa tutkittava painehäviöiden kannalta kriittiset pisteet. Nämä tehontarpeeseen suhteutettuna ahtaimmat putkiosuudet määrittävät, kuinka pienellä menolämpötilalla

saadaan toimitettua riittävä teho asiakkaille. Tämä tarkastelu kannattaa suuremmissa verkoissa tehdä simulointiohjelman avulla.

Uutta verkkoa mitoittaessa on menoveden suunnittelulämpötilan matalampi taso huomioitava. Mikäli uutta verkostoa suunnitellaan alle 90 asteen menolämpötilaan, voidaan verkostossa käyttää muoviputkia. Ne voivat olla edullisempia rakentaa ja siksi kannattavia vaihtoehtoja. [53]

## 4.6 Häviöt

Lämpöjärjestelmän tehokkuutta, kuntoa ja häviöitä voidaan tarkastella erilaisten tunnuslukujen avulla. Näitä tunnuslukuja ovat esimerkiksi lämpöjärjestelmän kokonaishyötysuhde, verkon suhteelliset lämpöhäviöt ja pumppausenergia.

Koko järjestelmän tehokkuutta kuvaa lämpöverkon hyötysuhde. Lämpöverkon hyötysuhde tarkoittaa kiinteistössä asiakkaan käyttämän lämmön ja verkkoon syötetyn lämmön suhdetta yhteyden -13 mukaan. [76]

$$\eta_{\text{lämpöverkko}} = \frac{\text{kulutettu lämpö (GWh)}}{\text{verkkoon syötetty lämpö (GWh)}} \quad (13)$$

Taulukossa 3 on esitetty kaukolämpöjärjestelmän lämpöhäviöiden ja muiden järjestelmän tehokkuutta kuvaavien tunnuslukujen tilastotietoa Suomesta vuosilta 1998-2001. Taulukon tiedot on saatu Riku Martikaisen diplomityöstä, sillä alkuperäinen Energiateollisuuden dokumentti ei ole enää löydettävissä.

*Taulukko 3. Suomen kaukolämpöyhtiöiden kaukolämpöjärjestelmien tehokkuutta kuvaavia tunnuslukuja vuosilta 1998-2001. Lähde: [77]*

Systeemin koko-luokka (MW)	<5	5-10	10-30	30-80	80-200	200-1000	>1000
Verkon suhteelliset lämpöhäviöt %	11,9	11,4	11,2	9,9	9,6	8,8	5,1
Kokonaishyötysuhde	77,9	77,5	79,9	81,4	83,3	83,5	84,1
Pumppausenergia	10,5	7,7	6,9	7,8	5,8	8,3	5,9
Kuorma/verkon pituus MW/km	0,6	0,65	1,25	1,65	1,66	1,88	2,6

### 4.6.1 Lämpöhäviöt

Lämpöhäviöiden määrittäminen laskennallisesti on mahdollista lämmönsiirto-opin perusteella. Seuraava lämpöhäviötarkastelu perustuu Energiateollisuus ry:n julkaisemaan Kaukolämmön käsikirjaan [2].

Sylinterimäiselle, eristetylle putkelle voidaan johtaa konvektiivista ja konduktiivista lämpöhäviötä kuvaava yhteys. Yhteyttä varten oletetaan, että maa putken ympärillä on keskimäärin vakiolämpötilassa  $T_g$  ja että lämpötilaerot siirtoputken sisällä virtaussuunnalle kohtisuorassa suunnassa voidaan jättää huomioimatta. Oletetaan

lisäksi verkon muodostuvan vierekkäin symmetrisesti sijaitsevista meno- ja paluu-putkesta. Näillä oletuksilla yhteys on seuraava :

$$\phi'_{\text{tot}} = \phi'_m + \phi'_p = 2(K_1 - K_2) \left[ \frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right] \quad (14)$$

Yhteydestä (14) nähdään, että lämpöhäviöt putkesta riippuvat meno- ja paluulämpötiloista, maan lämpötilasta ja putken ja maan lämmönjohto-ominaisuuksista, joita kuvaavat lämmönsiirtokertoimet  $K_1$  ja  $K_2$ .  $K_1$  ja  $K_2$  yksikkö on W/mK.

Yhteydessä (14) olevat meno- ja paluuputkien lämmönsiirtokertoimet  $K_1$  ja  $K_2$  ottavat huomioon maan ( $R_g$ ), putken eristeen ( $R_i$ ), ja putkien keskinäisen vaikutuksen ( $R_m$ ) lämmönvastuksen. Kun tarkastellaan kaukolämpöputkia, joissa virtausputken ympärillä on kiinnivaahdotettu eriste, voidaan  $K_1$ :lle ja  $K_2$ :lle johtaa seuraavat laskentayhtälöt:

$$K_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (15)$$

ja

$$K_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (16)$$

Yhtälöissä (15) ja (16) olevat lämpövastukset lasketaan seuraavasti: maan lämpövastus approksimoidulla yhteydellä (17)  $R_g$ :

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \left[ \frac{4H}{D_c} \right], \quad (17)$$

eristeen lämpövastus  $R_i$

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \left[ \frac{D_i}{D_p} \right] \quad (18)$$

ja putkien keskinäisen vaikutuksen lämpövastus  $R_m$ :

$$R_m = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln \left[ 1 + \left( \frac{2H}{E} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Kaavassa (17)  $D_c$  on yhtä kuin eristeen halkaisija  $D_i$  Kaavoissa (17) ja (19)  $\lambda_g$  on maan lämmönjohtavuus yksikössä W/m°C ja  $H$  laskennallinen sijaintisyvyys metreissä. Kaavassa (18)  $\lambda_i$  on eristeen lämmönjohtavuus,  $D_p$  on virtausputken ulkohalkaisija ja kaavassa (19)  $E$  on putkien etäisyys toisistaan

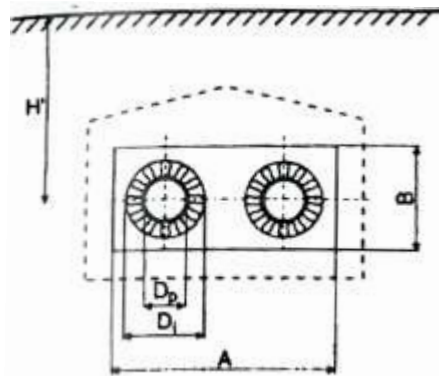
$$H = H' + \frac{\lambda_g}{h_{gs}}, \quad (20)$$

Laskennallisen sijaintisyvyyden  $H$  kaavassa (20)  $H'$  on todellinen sijaintisyvyys ja  $h_{gs}$  on lämmönsiirtokerroin maanpinnalla.

Mineraalivillalla eristetyille betonikanavaisille (EMV-tyyppi) lämpöputkille kertoimet  $K_1$  ja  $K_2$  voidaan laskea vastaavasti kuin polyuretaanilla eristetyille putkille. Tällöin laskennassa eristeen lämmönjohtavuudelle käytetään eri arvoa. Lisäksi betonikanavan lämmönvastus  $R_{hg}$  lisätään maan lämmönvastukseen.  $R_{hg}$  voidaan laskea yhteyden (21) avulla:

$$R_{hg} = \frac{1}{2(A+B)h_s} \quad (21)$$

Yhteyteen (21) liittyvät putken mitat on esitetty kuvassa 33:



Kuva 33. Mineraalivillaeristeisen betonielementtikanavan (EMV) lämpöhäviölaskentaa varten käytetyt mitat. Lähde: [53]

Edellä esitetyssä lämpöhäviöiden laskentatavassa ei huomioida veden ja putken rajapinnan ja virtausputken seinämän lämpövastusta ja polyuretaanilla eristettyjen lämpöputkien muovisuojakuoren lämpövastus oletetaan merkityksettömäksi.

Koko lämpöverkkojärjestelmän hyötysuhteen kannalta lämpöhäviöt lämpöverkostossa ovat hyvin merkittävät. Suomessa tilastotietoa kaukolämpöverkoston lämpöhäviöistä on kerännyt ainakin Energiateollisuus ry.

Näiden tilastotietojen perusteella verkon tehonsiirtoon suhteutetut lämpöhäviöt ovat verkostosta riippuen vaihdelleet 5,1 prosentista 11,9 prosenttiin vuosina 1998-2001. Kokoluokittain jaotellut tiedot löytyvät taulukosta 3. Lämpöhäviöitä esimerkiksi Otaniemessä tarkastellaan luvussa 5.2.

#### 4.6.2 Painehäviöt

Lämpöverkossa painehäviöitä syntyy kitkan vaikutuksesta, veden virratessa putkessa. Kitkaa aiheuttavat putkien lisäksi verkoston kertavastukset, kuten mutkat, haarat ja liittymät. Lisäksi painehäviötä aiheuttavat verkoston korkeuserot.

Painehäviöt riippuvat putken karheudesta, virtaavan aineen eli veden viskositeetista ja veden virtausnopeudesta, joka taas riippuu putken halkaisijasta ja tilavuusvirrasta. Painehäviöiden laskutapa riippuu siitä, onko virtaus laminaaria vai turbulenta. Tämä määritetään Reynoldsin luvun avulla. Lämpöverkossa virtaavalle vedelle voidaan useimmiten olettaa turbulentti virtaus [53].

Kokonaispainehäviö korkeuden aiheuttamaa painehäviötä lukuun ottamatta voidaan laskea riittävällä tarkkuudella turbulentsissa tapauksessa seuraavan yhteyden mukaan:

$$\Delta p = \Delta p_V + \Delta p_K = \left( \xi \frac{L}{d_s} + \sum \zeta \right) \frac{\rho w^2}{2}, \quad (22)$$

jossa  $\Delta p_V$  on virtausvastuksen aiheuttama painehäviö putkessa ja  $\Delta p_K$  kertavastuksen aiheuttama painehäviö putkessa. Yhteydessä (22)  $\xi$  on putkivirtauksen kitkakerroin,  $L$  putken pituus,  $d_s$  putken halkaisija,  $\sum \zeta$  kertavastuskerrointen summa,  $\rho$  virtaavan nesteen eli veden tiheys ja  $w$  virtausnopeuden keskiarvo putkessa. [53] Tätä yhteyttä käytettäessä oletetaan, että virtausnopeus säilyy vakiona putkessa.

Putkivirtauksen kitkakerroin  $\xi$  taas riippuu virtauksen turbulenttisuudesta eli Reynoldsin luvusta, veden kinemaattisesta viskositeetista, virtausnopeudesta ja putken karheuden suhteesta putken halkaisijaan.

Yleisesti painehäviö on likimain verrannollinen virtausnopeuden neliöön. Kun putken halkaisija ei muutu tämä tarkoittaa, että painehäviö on verrannollinen tilavuusvirran neliöön. [53]

Painehäviöt täytyy kompensoida pumppaustehoa lisäämällä. Tällöin voidaan taata riittävä paine-ero putkessa virtauksen ylläpitämiseksi.



## 5 Soveltavat laskelmat Otaniemessä

Tässä luvussa tutkitaan lämpöverkon merkitystä hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämisessä soveltaen Otaniemen alueelle. Lisäksi tutkitaan verkon lämpötilatason merkitystä lämpöhäviöiden suuruuteen Otaniemen verkossa laskelman avulla.

### 5.1 Lämpöverkon merkitys maalämpöä hyödyntävässä järjestelmässä Otaniemessä

Maalämpö on valittu tutkittavaksi hajautetun lämmöntuotannon muodoksi, sillä Kiinteistöyhtiö kartoittaa maalämmön hyödyntämismahdollisuuksia Otaniemessä. Maalämpöpumppujen tuottaman lämmön siirto on toisaalta haastavaa nykyisessä lämpöverkossa menoputkissa, sillä sen lämpötilataso ei riitä talviaikaan. Siksi laskelmassa pyritäänkin selvittämään mitkä verkon avulla lämmön siirtämisen hyödyt olisivat, jotta Kiinteistöyhtiö voisi verrata hyötyjä mahdollisiin verkkoinvestointeihin tai nykyiseen verkkoon syöttömahdollisuuden kehittämisen aiheuttamiin kuluihin. Lämpö voitaisiin myös mahdollisesti syöttää verkon paluulinjaan, mutta tällöin siitä ei saada välttämättä yhtä hyvää korvausta.

#### 5.1.1 Tavoite

Laskelman tavoitteena on selvittää, kuinka merkittävä lämpöverkko on maalämpöjärjestelmäinvestoinnin hyödynnettävyydelle esimerkkitapahtumassa Otaniemessä. Laskelman avulla verrataan neljää eri tapausta, joissa maalämpöjärjestelmien yhteenlaskettu tuottokapasiteetti on likimain yhtä suuri, mutta vain kahdessa tapauksessa lämpöpumppujen tuotto voidaan syöttää verkkoon ja hyödyntää muissa alueen rakennuksissa.

#### 5.1.2 Tutkittava kohde

Kohde, jota soveltavan laskelman avulla tutkitaan, sijaitsee Espoon Otaniemessä. Laskentaan on otettu mukaan sellaiset Kiinteistöyhtiön Otaniemessä omistamat rakennukset, joiden lämmönkulutuksen tuntista tietoa on saatavilla vuodelta 2012. Rakennukset ovat pääosin opetus-, tutkimus- ja toimistokäytössä.

Vuonna 2012 esimerkikiinteistöjen tuntinen huippulämpökuorma oli 21,03 MW ja koko vuonna rakennusten kuluttama lämpöenergia oli yhteensä 46 159 MWh. Yksittäisten rakennusten tuntisten huipputehojen summa oli 22,45 MW.

Laskelmassa tutkitaan neljää tapausta:

- 1) Joka talossa on erilliset maalämpöjärjestelmät, jotka kattavat 50 % kunkin talon huipputehon tarpeesta,
- 2) 1. tapauksen järjestelmä, jossa kaikkien talojen maalämpöjärjestelmät on kytketty lämpöverkkoon.
- 3) Järjestelmä, jossa 10 talossa on oma lämpöpumppu, joka kattaa kunkin talon huipputehon ja

4) 3. tapauksen 10 talon maalämpöjärjestelmät on kytketty lämpöverkkoon.

Tapauksia 3 ja 4 varten on maalämpöjärjestelmän sisältämät talot valittu siten, että niiden yhteyteen mahtuu mahdollisesti sijoittamaan maalämpöjärjestelmiä. Tutkitun alueen talot ovat käyttötarkoitukseltaan hyvin samankaltaisia. Talot ovat pääosin tutkimus- opetus- ja toimistokäytössä ja siten lämmönkulutuksen vuorokausiprofiili on samankaltainen.

Lämmönkulutuksen profiilia vuorokauden ja vuoden aikana voidaan vertailla eri talojen välillä keskenään esimerkiksi Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla. Pearsonin korrelaatiokerroin kuvaa kahden suureen lineaarista riippuvuutta. Pearsonin korrelaatiokerroin ottaa huomioon suureiden normitetut arvot [78], joten sen avulla voidaan tutkia eri kokoluokan suureiden keskinäistä riippuvuutta. Tällöin myös erikokoisten lämmönkuluttajien lämmönkulutusprofiilia voidaan verrata keskenään korrelaatiokertoimen avulla.

Korrelaatiokerroin  $r$  saadaan laskettua yhteyden (23) avulla [78],:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{x_k - \bar{x}}{s_x} \frac{y_k - \bar{y}}{s_y} \quad (23)$$

Yhteydessä (23)  $n$  on havaintojen määrä,  $k$  havainnon indeksi,  $\bar{x}$  ja  $\bar{y}$  ovat  $x$ - ja  $y$ -muuttujien keskiarvot havaintojoukossa ja  $s_x$  ja  $s_y$  vastaavasti  $x$ :n ja  $y$ :n keskihajonnat.

Korrelaatiokerroin voi saada arvoja väliltä  $[-1,1]$ .  $-1$  tarkoittaa suoraa negatiivista korrelaatiota,  $1$  taas suoraa positiivista korrelaatiota, eli tällöin lämmönkulutukset käyttäytyvät täysin samansuuntaisesti [78]. Mitä suurempi korrelaation itseisarvo on, sitä vahvempi on korrelaatio. Korrelaatiolukujen suuruuden tulkinta riippuu tutkitun otoksen suuruudesta ja havaintojen hajonnasta. Joidenkin lähteiden mukaan yli  $0.57$ , joidenkin lähteiden mukaan yli  $0,7$  korrelaatiokerroin tarkoittaa merkitsevää yhteyttä muuttujien välillä.

Eri talojen lämmönkulutuksen vuodenaikaisen jakauman keskinäisiä korrelaatioita tarkasteltiin muodostamalla niistä korrelaatiomatriisi. Talojen lämmönkulutuksen keskinäiset korrelaatiot ovat pääosin lähellä  $0,9$ :ää. Vesilaboratorion ja Open Innovation Housen korrelaatiot muiden talojen lämmönkulutuksen kanssa olivat  $0,6 \dots 0,8$  ja ainoan asumiskäytössä olevan rakennuksen eli tutkijahotelli Aalto Innin lämmönkulutuksen korrelaatio muiden rakennusten kanssa oli vain  $0,2 \dots 0,44$ .

Tämä vahvistaa oletusta, että tutkimus- opetus- ja toimistokäytössä olevien talojen välinen korrelaatio on voimakkaampi kuin erityyppisten talojen keskinäinen korrelaatio. Open Innovation House on taas hyvin uusi talo, joka on suunniteltu hyvin energiatehokkaaksi. Tämä näkyy talossa siten, että huippukulutuksen suhde kokonaiskulutukseen on muita taloja suurempi, eli lämmönkulutuksen yleinen matala taso aiheuttaa suhteellisesti suuremmat lämmönkulutushuiput. Koko matriisi on esitetty liitteessä 2.

### 5.1.3 Tehdyt oletukset

Laskelmassa on oletettu, että lämpö tuotetaan ensisijaisesti maalämmöllä ja mikäli maalämpö ei riitä, katetaan yli menevä kulutus muulla lämmönlähteellä, esimerkiksi suoralla sähkölämmityksellä tai kaukolämmöllä.

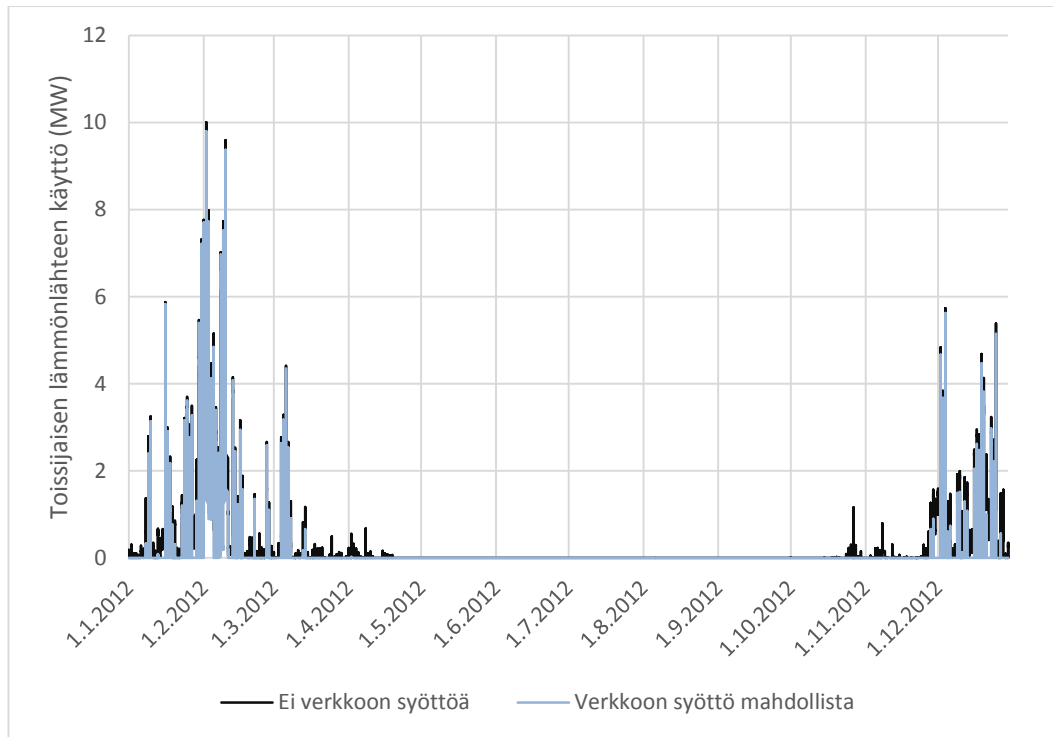
On myös oletettu, ettei käytössä ole lämpövarastoja ja että maalämmön tuotantoa voidaan säädellä portaattomasti. Tämä oletus on siinä mielessä järkevä, että maalämmön tuottoa voidaan kyllä säätää todellisuudessaakin, mikäli lämpöpumpun kompressorin on invertteriohjattu, eli se voi toimia osateholla. Oletus ei kuitenkaan huomioi hyötysuhteen laskua siinä tilanteessa, kun lämpöpumpun tehoa lasketaan tai nostetaan. Esimerkkilaskelmassa ei ole myöskään huomioitu lämmönsiirron aiheuttamia häviöitä.

Laskelmalla ainoastaan tutkitaan lämpöverkon merkitystä, kun kulutukset ja järjestelmän mitoitus ovat molemmissa tapauksissa yhtä suuret. Esimerkkilaskelmassa lähtötietona on käytetty kiinteistöjen toteutuneita lämmönkulutustietoja vuodelta 2012.

### 5.1.4 Tulokset

Tapauksissa 1 ja 2 oletettiin, että Otaniemessä maalämpöjärjestelmä mitoitettaisiin kattamaan 50 % kunkin talon huippukulutuksesta. Erillisissä taloissa tällaisella järjestelmällä tuotettaisiin vuodessa 43 300 MWh, mikä vastaa 94 % koko lämmönkulutuksesta esimerkkikiinteistöissä vuoden aikana. Mikäli hyödynnettäisiin lämpöverkkoa maalämmön siirtämiseen, maalämpöä voitaisiin hyödyntää samalla järjestelmällä 44 300 MWh (96 %). Erillisissä taloissa tuotetun maalämmön tueksi tarvittaisiin siis 2 900 MWh muuta lämpöä, mutta lämpöverkon kanssa muun lämmön kulutus tippuisi 1 800 MWh:iin.

Toissijaisen lämmityksen huipputeho ei muuttuisi merkittävästi. Huipputehontarve putoaisi 10,0 MW:sta 9,80 MW:iin., eli 0,20 MW:ia. Toissijaisen lämmönlähteen kulutus molemmissa tapauksissa on esitetty kuvassa 34.



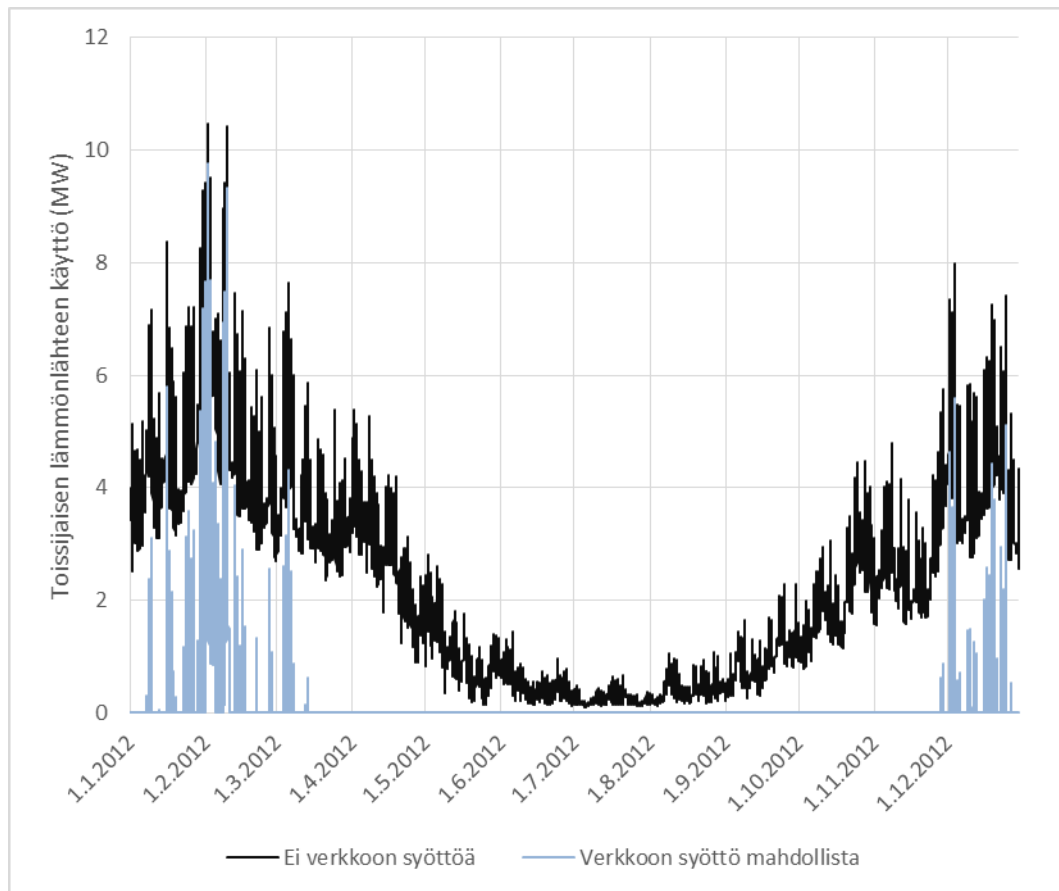
Kuva 34. Tapaukset 1 ja 2. Toissijaisen lämmönlähteen käyttö, kun suurin osa lämmön tuotannosta katetaan maalämmöllä. Kuvassa on esitetty tapaukset, joissa joka rakennuksessa on 50 % huipputehosta mitoitettu maalämpöjärjestelmä. Musta viiva edustaa tapausta, jossa lämmöntuotto ei ole kytketty lämpöverkkoon ja sininen tapausta, jossa on. Lämmön kulutustietojen lähde: Aalto-yliopistokiinteistöt Oy

Kuvasta 34 nähdään, että järjestelmässä ilman lämpöverkkoa pelkällä maalämmöllä pystytään kattamaan rakennusten lämmöntarve lyhyemmän aikaa vuodessa, kuin lämpöverkon sisältävässä energiajärjestelmässä. Ilman lämpöverkkoa toissijaista lämmitystä joudutaan laskelman mukaan käyttämään lokakuun puolivälistä huhtikuun puoliväliin. Lämpöverkon sisältävässä esimerkkijärjestelmässä toissijaista lämmönlähdettä tarvittaisiin joulukuusta maaliskuun puoliväliin.

Tapauksissa 3 ja 4 oletettiin, että 10 rakennuksessa on oma maalämpöjärjestelmä, josta tapauksessa 3 ei voida syöttää ja tapauksessa 4 voidaan syöttää lämpöä verkkoon. Tapauksissa 3 ja 4 maalämmön verkkoon syöttämismahdollisuuden hyödyt tulevat paljon selkeämmin esiin.

Tapauksissa 3 ja 4 ilman verkkoa 10 rakennuskohtaista maalämpöjärjestelmää voivat tuottaa vain näiden rakennusten tarpeen mukaisen lämmön ja muiden rakennusten lämmöntarve on katettava toissijaisella lämmönlähteellä. Maalämpöpumpuilla pystytään ilman verkkoon syöttömahdollisuutta tuottamaan 25 300 MWh lämpöä, mikä vastaa 55 % koko lämmönkulutuksesta. Vastaavasti pumpuilla pystyttäisiin tuottamaan 44 300 MWh (96 % koko kulutuksesta), mikäli lämmön syöttö verkkoon on mahdollista. Toissijaisen lämmönlähteen huipputehon tarve vähenisi 10,47 MW:sta 9,77 MW:iin eli 0,70 MW.

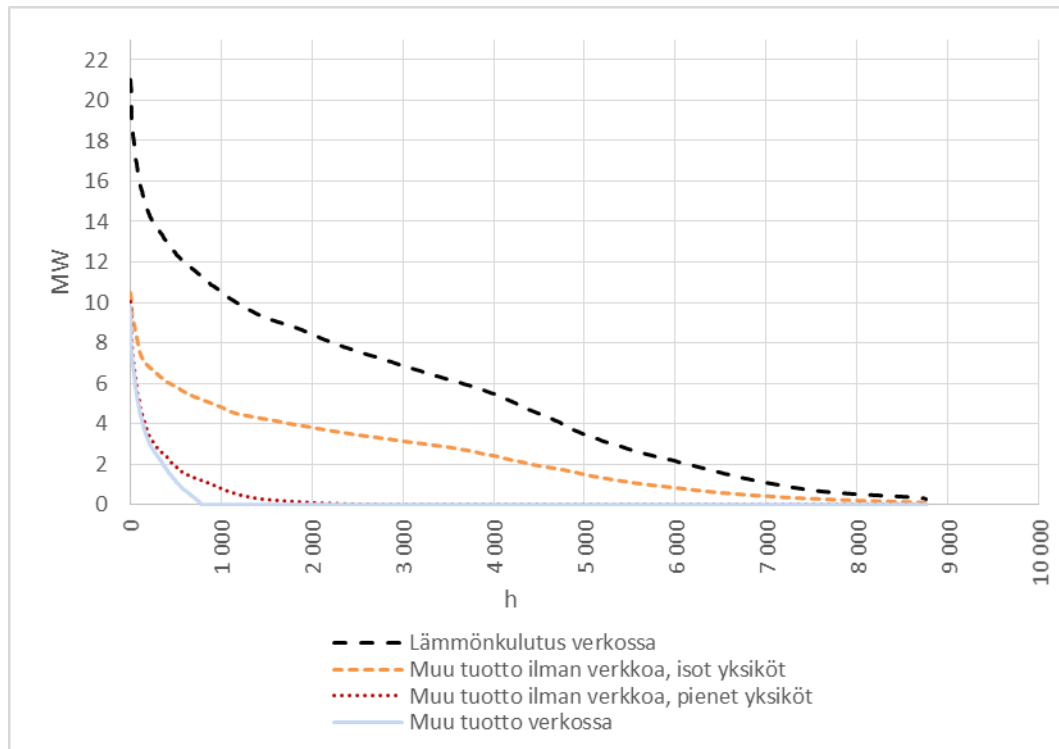
Toissijaisen lämmönlähteen kulutus tapauksissa 3 ja 4 on esitetty kuvassa C. Kuvassa musta viiva kuvaa tapausta 3, jossa ei voida syöttää maalämpöä verkkoon ja sininen viiva tapausta, jossa lämpöä voidaan syöttää verkkoon.



Kuva 35. Tapaukset 3 ja 4. Toissijaisen lämmönlähteen käyttö, kun osassa rakennuksia on huipputehon tarpeen kattava maalämpöjärjestelmä ja osassa ainoastaan toissijainen lämmönlähde. Kuvassa musta viiva edustaa tapausta, jossa maalämpöpumppujen lämmöntuotto ei ole kytketty lämpöverkkoon ja sininen tapausta, jossa on. Lämmön kulutustietojen lähde: Aalto-yliopistokiinteistöt Oy

Laskenta on tehty siten, että tapaukset 2 ja 4 ovat käytännössä sama tapaus, sillä niissä yhteenlaskettu maalämpökapasiteetti on sama ja sitä voidaan käyttää kaikissa rakennuksissa tarpeen mukaan lämpöverkon ansioista. Tapauksille on annettu eri numero vertailun selkeyttämiseksi.

Seuraavassa kuvassa on esitetty vielä tapausten 1, 3 ja 2/4 toissijaisen lämmönlähteen käytön pysyvyyskäyrät sekä koko lämmönkulutuksen pysyvyyskäyrä.



Kuva 36. Toissijaisen lämmönlähteen tuoton ja kokonaiskulutuksen pysyvyyskäyrät tapauksissa 1, 3 ja 2/4. Tapauksessa 1 (keltainen viiva) joka talossa on oma 50 % huipputehosta mitoitettu maalämpöjärjestelmä ja tapauksessa 3 kymmenessä talossa oma huipputehollle mitoitettu järjestelmä. Tapauksessa 2/4 (vaalean sininen viiva) on mahdollisuus syöttää verkkoon maalämpöä.

### 5.1.5 Johtopäätökset

Laskelmien perusteella voidaan todeta, että lämpöverkolla on suuri merkitys, mikäli tutkitulla alueella halutaan rakentaa maalämpöä vain joillekin optimaalisille alueille ja sopivien rakennusten yhteyteen. Tätä kuvaavat tapaukset 3 ja 4. Tällöin verkko mahdollistaa maalämmön käytön myös niissä rakennuksissa, jotka eivät ole maalämpöjärjestelmän välittömässä läheisyydessä.

Tapauksien 1 ja 2 (joka talossa maalämmön mitoitus 50 % huipputehosta) erot toissijaisen lämmönlähteen tarpeessa johtuvat lämmönjakomahdollisuudesta ja lämmönkulutushuippujen eriaikaisuudesta. Vaikka jonkin rakennuksen oman maalämpöjärjestelmän hetkellistä, esimerkiksi käyttöveden lämmityksestä johtuvaa kulutushuippua ei voitaisi kattaa talokohtaisella maalämpöjärjestelmällä, saadaan lämpöä siirrettyä muualla olevista maalämpöpumpuista lämpöverkon avulla, mikäli kulutushuippu ei ole yhtäaikainen muiden talojen kanssa.

Vaikka tarkasteltavan alueen rakennuksien käyttötarkoitukset ovat hyvin samankaltaiset, tehontarve vaihtelee silti rakennusten välillä. Tätä vaihtelua lisäisi, mikäli tutkimusta laajennettaisiin myös alueen asuintaloihin.

Tulkittaessa laskelman tuloksia on huomattava, että maalämpöpumpun käyttö ei osateholla ole optimaalista, mutta se on mahdollista. Lämpöpumpun tehon muuttamisen vaikutusta hyötysuhteeseen ei ole huomioitu laskelmassa. Toisenlainen optimointitehtävä on valita sopivankokoiset lämpöpumppuyksiköt, jotta niitä voidaan ajaa mahdollisimman täydellä teholla. Lämpöverkko tosin tuo tähänkin joustavuutta: täydellä teholla käyvien lämpöpumppujen tuottamaa lämpöä voidaan käyttää useissa rakennuksissa tarpeen mukaan.

Lämpöverkon lämpöhäviöitä ei ole huomioitu laskelmassa. Ne on kuitenkin otettava huomioon todellisen järjestelmän suunnittelussa.

Jatkotutkimusmahdollisuus on rajata tutkittavaa aluetta kattamaan vain maalämmön hyödyntämisen kannalta sopivimmiksi todetut rakennukset ja niiden lähimmät naapurit. Tällöin voidaan selvittää mahdollisen pienemmän maalämmön erillisverkon merkitystä. Rajatun alueen tutkiminen myös auttaa suunniteltaessa mahdollista lämpöjärjestelmän uudistamista alueella vaihteittain, kortteli kerrallaan.

## **5.2 Lämpötilatason vaikutus lämpöverkon lämpöhäviöihin Otaniemessä**

Lämpöhäviöillä on suuri merkitys lämpöverkkoa hyödynnettäessä. Lämpöverkon menoveden lämpötilan tiedetään kirjallisuuden perusteella olevan karkeasti suoraan verrannollinen lämpöhäviöihin lämpöverkosta. Tästä syystä menoveden keskimääräisen lämpötilan vaikutusta tarkastellaan seuraavaksi Otaniemen lämpöverkossa

### **5.2.1 Tavoite**

Putkien meno- ja paluulämpötilatason vaikutusta lämpöhäviöihin Otaniemen kaukolämpöverkossa tarkastellaan seuraavassa laskelmassa. Tarkoitus on selvittää lämpöhäviöiden suuruusluokka ja keskimääräisen lämpötilatason muutoksen vaikutus lämpöhäviöihin Otaniemen lämpöverkossa.

### 5.2.2 Tutkittava lämpöverkko ja tehdyt oletukset

Kuvassa 37 on esitetty Fortum Power and Heat Oy:n omistama kaukolämpöverkko Otaniemessä. Kuvassa verkon putkikoot on esitetty kolmessa kokoluokassa.



Kuva 37. Otaniemen kaukolämpöverkosto kolmeen putkikokoluokkaan jaoteltuna.

Kuten kuvasta 37 nähdään, tulee lämpö Otaniemen alueelle pääasiassa suurista, yli DN 250 kokoisista putkista pitkin Otaniemen ulkopuolelta ja näistä suurista putkista lämpö jaetaan pienempien putkien välityksellä päälinjoista pienempiin linjoihin ja asiakkaille. Lisäksi mm. lämmityskauden huippukulutuksen aikaan myös Otaniemessä sijaitsevaa huippulämpölaitosta hyödynnetään kulutuspiikkien kattamiseen.

Otaniemen lämpöverkossa käytössä olevat putkityypit ovat 2 Mpuk ja Mpuk, (kiinni vaahdotettu polyuretaanieriste), 2 Mpul ja Mpul eli Fiskars -kanavat (virtausputken ympärillä olevassa suojakuoressa kiinni oleva polyuretaanieriste) ja Emv (betonielementtikanaavassa oleva mineraalivillalla eristetty putki). Kuvassa 38 on kartta, jossa on esitetty Otaniemen kaukolämpöverkon pääasialliset putkityypit.





Kuva 38. Otaniemen kaukolämpöverkko pääasiallisten putkityyppien mukaan esitettynä

### 5.2.3 Alkuarvot ja tehdyt oletukset

Putkissa virtaavan veden lämpötila laskee lämpöhäviöiden vuoksi kun edetään kauemmas lämmöntuotannosta verkossa. Lisäksi lämpötilataso nousee taas huippulämpötilalta tultaessa. Asiakkaiden tehonkulutuksen muutokset ja niistä seuraavat veden virtausnopeuden muutokset vaikuttavat myös lämpöhäviöiden suuruuteen. Näitä lämpötilatason vaikuttavia tekijöitä ei ole pyritty huomioimaan laskelmissa, vaan koko verkkoa tutkitaan keskimääräisten meno- ja paluulämpötilojen avulla.

Menoveden keskimääräisen lämpötilan vaikutusta tutkitaan laskemalla talvella ja välikaudella 5 eri keskimääräisellä lämpötilalla. Paluuveden lämpötilan muutos ei korreloi suoraan menoveden lämpötilan muutoksen kanssa: menoveden lämpötilan muutos voi nostaa tai laskea paluuveden lämpötilatasoa verkostosta ja kuluttajarakenteesta riippuen [51]. Laskelmissa tutkitaan lämpöhäviöitä välikauden ja talven keskimääräisten lämpötilatasojen mukaan, jolloin talvella oletetaan vakiona pysyvä 50 asteen paluuveden lämpötila ja välikaudella 40 asteen lämpötila. Maan lämpötilan oletetaan olevan vakio 5 astetta.

Otaniemen lämpöverkon lämpöhäviöiden laskemiseksi on käytetty putkiston ja maaperän ominaisuuksista taulukoiden 4, 10 ja 6 mukaisia alkuarvoja. Taulukossa 4 on esitetty maan, eristeiden ja betonikanavan ominaisuuksia. Taulukossa 10 on esitetty lämpöputkien ja niiden eristeiden dimensioita. Dimensioista DN 300 ja sitä suuremmat on ekstrapoloitu pienemmistä putkiko'ista.

Taulukko 4. Lämpöhäviölaskennan alkuarvoja - maan, eristeiden ja kanavan ominaisuuksia

Suure	Symboli	Suuruus	Yksikkö
Putken todellinen sijaintisyvyys	H	0,6	m
Maaperän lämmönjohtavuus	$\lambda_g$	1,7	W/m°C
Polyuretaanin lämmönjohtavuus	$\lambda_{PU}$	0,035	W/m°C
Mineraalivillan lämmönjohtavuus	$\lambda_{MV}$	0,046	W/m°C
Lämmönsiirtokerroin maanpinnalla	$\lambda_{gs}$	13	W/m°C
Maaperän keskimääräinen lämpötila	$T_m$	5	°C
Betonikanavan ilmatilan leveys	A	0,9	m
Betonikanavan ilmatilan korkeus	B	0,45	m

Seuraavassa taulukossa 5 olevia arvoja käytetään laskennassa muille lämpöputkityypeille, paitsi betonikanavaisille mineraalivillaeristetyille (Emv) putkille.

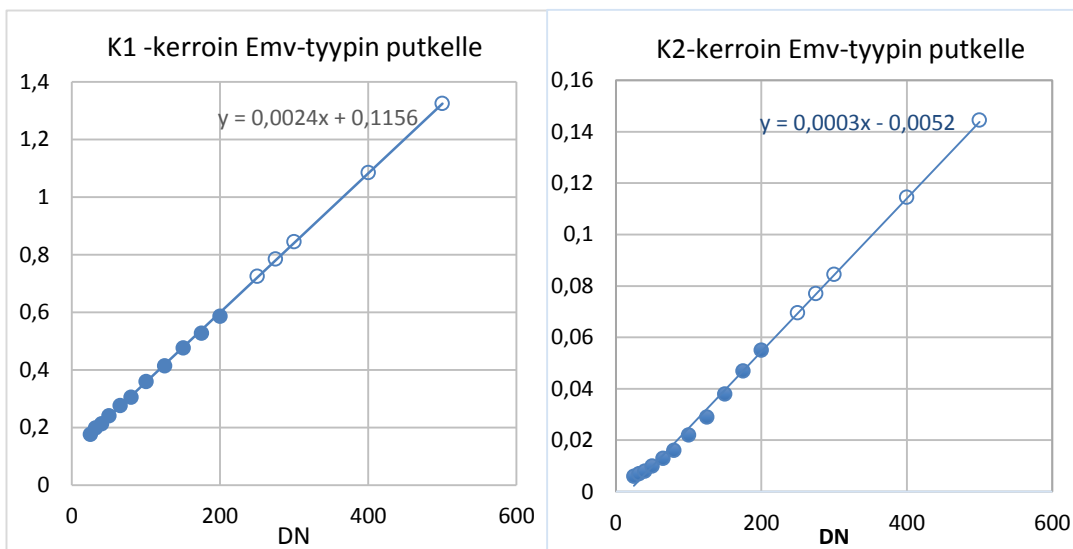
Taulukko 5. Lämpöputkien ja niiden eristeiden dimensioita. Punaiset arvot on ekstrapoloitu pienemmistä arvoista. Lähde: [53]

Putken koko	Eristeen sisähal- kaisija	Eristeen ulkoal- kaisija	Putkien etäisyys toi- sistaan
DN	Dp, mm	Di, mm	E, mm
25	33,7	118,1	275
40	48,3	133,1	290
50	60,3	153,1	310
65	76,1	174,1	330
80	88,9	192,3	350
100	114,3	240,3	400
125	139,7	269,1	430
150	168,3	302,7	465
175	193,7	343,4	532,5
200	219,1	384,1	600
250	273	446	650
275	293,775	472,78	700
300	314,55	499,55	750
400	410	615	900
500	512	700	1100

Betonikanavaisten putkien lämpöhäviöiden laskentaan käytetyt lämmönsiirtokerroimet  $K_1$  ja  $K_2$  on esitetty taulukossa 6. Nämä betonikanavia koskevat arvot on saatu Tuukka Ojasen Mikkelin ammattikorkeakoulun Talotekniikan koulutusohjelmaan tehdystä insinööritoiminnasta [79]. Näistä arvoista on lineaarisesti ekstrapoloitu putkikoot DN 250:sta ylöspäin. Ekstrapolointi on perusteltua, sillä kerrointen ja putkikoon välille voi helposti sovittaa lineaarisen yhteyden. Taulukon yhteydessä olevissa kuvissa on esitetty dataan sovitettu suora ja datapisteet sekä ekstrapoloituneet pisteet.

Taulukko 6. Betonikanavaisen lämpöputken  $K_1$  ja  $K_2$  -arvot. DN 250 ja sitä suuremmille putkikoille ekstrapoloitiin vastaavat arvot käyttämällä lineaarista sovitetta. Lineaariset sovitteet ja datapisteet sekä ekstrapoloituneet pisteet on esitetty taulukon vieressä olevissa kuvissa.

Putkikoko	$K_1$	$K_2$
DN	-	-
25	0,177	0,006
32	0,199	0,007
40	0,213	0,008
50	0,241	0,01
65	0,276	0,013
80	0,305	0,016
100	0,36	0,022
125	0,414	0,029
150	0,476	0,038
175	0,5275	0,047
200	0,587	0,055
250	0,725	0,0695
275	0,785	0,077
300	0,845	0,0845
400	1,085	0,1145
500	1,325	0,1445



Kuva 39.  $K_1$  ja  $K_2$  -kertoimien ekstrapolointi. Arvot DN200 asti lähteestä [79].

Otaniemen kaukolämpöverkon eri putkityyppien pituudet on koottu taulukkoon 7. Taulukon putkipituudet on laskettu lämpöyhtiö Fortum Power and Heat Oy:n ilmoittamien putkielementtien koordinaattien perusteella. Liitoksia ja kulmia ei siis ole huomioitu putkien pituuksissa eikä lämpöhäviölaskelmassa.

Taulukko 7. Otaniemen lämpöputkien pituudet putkityyppien ja putkikoon mukaan jaoteltuina. Lähde: Fortum Power and Heat Oy

Putkikoko	Putkipituudet tyypeittäin							
DN	2Mpuk	2Mpul	Ei tiet.	Emv	Mpuk	Mpul	Teräsp.	Yhteensä
	m	m	m	m	m	m	m	m
0	78,9		44,0					122,9
32				33,6				33,6
40	94,2					14,0		108,3
50	511,4			118,4		60,5		690,3
65	757,2			481,4		2,2		1240,9
80	877,7			258,0		128,0		1263,7
100	1200,7			445,5	111,0	85,8	17,7	1860,7
125	243,4			469,6				713,0
150	790,8	2,0		1575,5		214,1		2582,4
175				151,5				151,5
200	1548,0			873,2				2421,2
250	520,9			1425,3				1946,2
275				37,5				37,5
300	1935,4			73,0				2008,3
400	82,3			24,3				106,7
500	1829,2							1829,2
600	659,9							659,9
<b>Yhteensä</b>	<b>11130,1</b>	<b>2,0</b>	<b>44,0</b>	<b>5966,9</b>	<b>111,0</b>	<b>504,7</b>	<b>17,7</b>	<b>17776,4</b>

## 5.2.4 Laskenta

Lämpöhäviöt lasketaan eri menoveden ja paluuveden keskimääräisille lämpötiloille. Laskennassa käytetään luvun 4.6.1 mukaisia lämpöhäviöiden yhtälöitä ja edellisen luvun mukaisia alkuarvoja Otaniemen lämpöputkille. Laskennassa Mpuk, Mpul, 2 Mpuk ja 2 Mpul -tyyppisten lämpöputkien lämpöhäviöt on laskettu yhteiset  $K_1$ - ja  $K_2$ -kertoimet ja Emv-tyyppisille on hyödynnetty taulukon 6 mukaisia  $K_1$ - ja  $K_2$ -kertoimia.

## 5.2.5 Tulokset

Laskennan tuloksena keskimääräisen menolämpötilan tiputtaminen laski odotetusti lämpöhäviöitä. Tulokset on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Lämpöverkon lämpöhäviöt talvi- ja välikaudella keskimääräisen menoveden lämpötilan mukaan Otaniemen lämpöverkossa.

	Talvi, $T_p = 50$		Välikausi, $T_p = 40$	
$T_M$	kW	MWh/kk	kW	MWh/kk
110	1040	759		
105	1006	734		
100	971	709		
95	936	683	867	633
90	902	658	833	608
85			798	582
80			763	557
75			728	532

Kokonaislämpöhäviöt lämpöverkosta ovat merkittävät. Talvikuukausina n. 760 MWh lämpöhäviöt kuukauden aikana vastaavat suuruusluokaltaan esimerkiksi Otaniemen Konetekniikka 1 (Otakaari 4) talon koko vuoden aikaista lämmönkulutusta. Konetekniikka 1 talossa on 8600 m<sup>2</sup> ja sen energiatehokkuusluokka on E.

Kuten taulukosta 8 huomataan, jo 5 asteen keskimääräisen menoveden lämpötilan pudotus alkuperäisestä laskee lämpöhäviöitä Otaniemen lämpöverkossa noin 25 MWh kuukaudessa. Tämä vastaa Otaniemen Maarintalon keskimääräistä kuukausittaista kaukolämmönkulutusta. Maarintalon pinta-ala on 3770 m<sup>2</sup> ja sen energiatehokkuusluokka on E.

### 5.2.6 Johtopäätökset

Tuloksien perusteella voidaan päätellä, että lämpöhäviöt ovat merkittäviä Otaniemen lämpöverkossa. Lämpötilan alentaminen vähentää lämpöhäviöitä. Lämpötilan alentamisella on kuitenkin muitakin seurauksia, jotka voivat aiheuttaa kustannusten nousua, kuten painehäviöiden kasvu ja mahdolliset investointitarpeet lämpöasiakkaiden lämmönvaihtimiin. Toisaalta verkon lämpötilatason lasku edesauttaa hajautettujen matalampilämpötilaisten lämmönlähteiden käyttöä. Näitä vaikutuksia on esitelty luvussa 4.5.

Esimerkiksi Fortumin ja VTT:n tekemässä tutkimuksessa tarkasteltiin energiatehokkaiden asuntojen kaukolämpöratkaisuja. Tutkimuksessa simuloitiin mm. vaihtoehtoa, jossa osa alueen taloista olisi matalamman lämpötilan lämpöverkossa ja tätä verrattiin samojen talojen pysymiseen normaalilämpötilaisessa verkossa. Tuloksena huomattiin, että pumppauskustannusten merkitys lämpöhäviökustannuksiin verrattuna oli hyvin pieni molemmissa tapauksissa, luokkaa 500-1000 €/vuosi, kun taas lämpöhäviöt aiheuttaisivat n. 15 000-17 000 euron kulut vuosittain simuloitulla alueella. Toisaalta myöskään lämpöhäviöiden pieneneminen ei ollut merkittävää koko alueen kannalta, kun katsotaan vaikutusta alueen lämpöverkon lämpöhäviöihin ja lämpöhäviöiden aiheuttamiin kustannuksiin.

Lämpöhäviöiden tarkempi tarkastelu simulointilaskennan avulla onkin myös Ota-niemen alueella tarpeen, mikäli lämpöhäviökustannuksia halutaan verrata verkon lämpötilan alentamisesta mahdollisesti seuraaviin muihin kustannuksiin. Lämpöhäviölaskennan tuloksia voi käyttää suuntaa-antavina arvioina, mutta ne eivät vielä sellaisenaan riitä päätöksentekoon.

## 6 Tulokset

### 6.1 Lämpötilataso lämpöverkon merkittävin ominaisuus

Tämän tutkimuksen tulos on, että lämpöverkon lämpötilataso on verkon merkittävvin ominaisuus hajautetun lämmöntuotannon kannalta. Lämpötilatason vaikutusta lämpöjärjestelmässä on käsitelty luvussa 4.5 ja merkitystä erityisesti hajautetussa lämmöntuotannossa alaluvussa 4.5.1. Näiden lukujen tulokset on koottu tähän lukuun, sillä ne ovat keskeisiä hajautetun lämmöntuotannon kannalta.

Hajautetun lämmöntuotannon lähteistä erityisesti aurinkolämpö, maalämpö ja rakennusten tuottama hukkalämpö ovat sitä paremmin hyödynnettävissä, mitä alhaisempi lämpöverkon lämpötilataso on. Lämpötilan laskun hyötyjä hajautetun lämmöntuotannon kannalta on lueteltu seuraavaksi:

- 1) Aurinkolämmön ja maalämmön hyötysuhde paranee, mikäli tavoitelämpötilaa alennetaan.
- 2) Hukkalämmön syöttäminen suoraan verkkoon voi olla lähteestä riippuen kallista tai jopa mahdotonta, mikäli lämpöverkon lämpötilataso on korkea.
- 3) Siirtohäviöt hajautetun lämmöntuotannon lähteistä kulutuskohteisiin pienevät.
- 4) Hajautetulle lämmöntuotantojärjestelmälle ominainen lämmöntuotannon vaihtelu ja lämmön tuotannon ja kulutuksen tasaustarve hyötyy lämpövarastoista. Yleisimmin käytettyjen lämpökapasiteettiin perustuvien lämpövarastojen lämpöhäviöt ovat sitä suuremmat, mitä korkeammassa lämpötilassa lämpö varastoidaan.
- 5) Lisäkustannuksia aiheutuu, mikäli lämmönlähteiden lämpötilataso ei riitä, ja aurinkolämmön ja hukkalämmön lämpötilatasoa nostetaan lämpöpumpujen avulla.

Toisaalta lämpöverkon lämpötilatasoa rajoittavat seuraavat tekijät

- 1) Lämpöverkon tehonsiirtokyky on riitettävä kaikissa tilanteissa,
- 2) Riittävän lämpötehon siirtämiseksi lämpötilatason alentaminen nostaa veden virtausnopeutta verkossa, mikä lisää painehäviöitä ja kasvattaa pumpauskustannuksia.
- 3) Lämmön kuluttajien lämmönsaanti lämmityslaitteiden avulla on turvattava.
- 4) Lämpimän käyttöveden lämpötilatason oltava 58 legionellabakteerin liiallisen kasvun välttämiseksi.

Lämpöverkon lämpötilaa rajoittava tehonsiirtotarve voi pienentyä tulevaisuudessa, sillä rakennusten energiatehokkuutta parannetaan. Tällöin sen merkitys rajoittavana tekijänä vähenee.

Mikäli lämpöverkon lämpötilatasoa ei ole kannattavaa tai mahdollista alentaa, on lämmöntuotannon kytkeminen silti mahdollista. Hajautetun lämmöntuotannon lämpötilatasoa voidaan nostaa lämpöpumpun avulla tai lämpöä voidaan syöttää menoputken asemasta paluuputkeen.

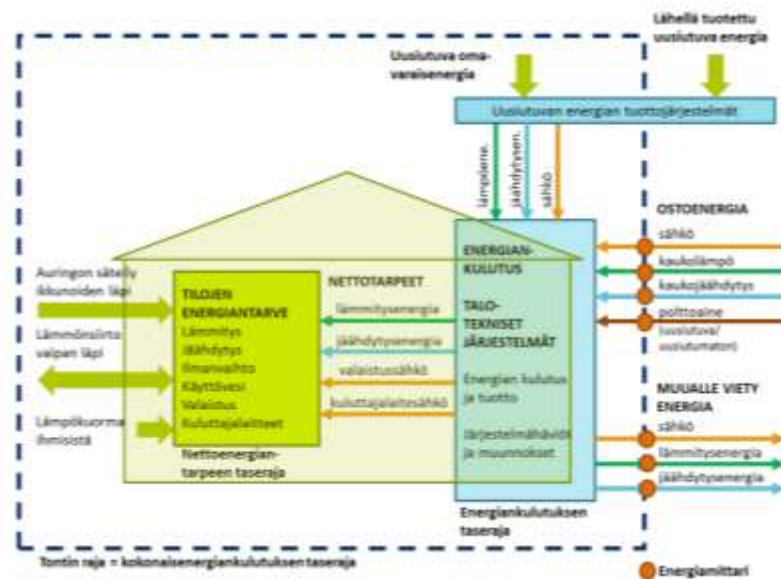
Sekä rajoitukset lämpötilan laskulle, että siitä seuraavat hyödyt hajautetun lämmöntuotannon kannalta on vertailun vuoksi kannattavaa yhteismitallistaa. Yhteismitallistaa voidaan esimerkiksi lämpötilatason muutoksesta seuraavien kasvihuonekaasupäästöjen muutoksen avulla tai kustannusvaikutusten avulla.

## 6.2 Lämpöverkon merkitys energiaomavaraisuuden kannalta

Lähes energiaomavaraiset rakennukset ja alueet tuottavat suurimman osan kuluttamastaan energiasta. Ne siis hyödyntävät hajautettuja rakennuskohtaisia energianlähteitä.

Lähes energiaomavaraiset rakennukset (nZeb -rakennukset) ja alueet eivät kuitenkaan välttämättä käytä joka hetki vain itse tuotettua energiaa. Ne tuottavat vuoden aikana lähes yhtä paljon energiaa, kuin kuluttavat. Ne voivat siis olla kytköksissä valtakunnalliseen sähköverkkoon ja paikalliseen lämpöverkkoon.

Suomessa valmistellaan ehdotusta lähes nollaenergiatalon määrittelymiseksi Suomen olosuhteisiin. Ehdotusta valmisteleva FinZEB-työryhmä koostuu rakennusalan, rakennustuotealan, Helsingin kaupungin, ympäristöministeriön, yliopistojen ja konsulttien edustajista. Lisäksi on käytetty asiantuntijajäseniä mm. VTT:ltä. Työryhmän valmistelemassa ehdotuksessa energian taserajaksi on katsottu rakennuksen tontti. Tämä on esitetty kuvassa 40, jossa näkyvät rakennukseen tuotu energia, rakennuksesta viety energia ja rakennuskohtainen tuotettu energia. [8]



Kuva 40. Lähes nollaenergiatalon taserajat ja energiavirrat. Lähde: [8]



Kuvasta 40 nähdään, että lähes nollaenergiatalokin voi toisena ajanhetkenä kuluttaa ulkopuolelta tuotuja energianlähteitä ja taas toisena ajanhetkenä viedä enemmän kuin tuoda. [20, 40]

FinZeb -työryhmä ehdottaa, että lähes nollaenergiatalo määriteltäisiin rakennuksen energiatehokkuutta kuvaavan E-luvun avulla. Työryhmän ehdotuksen mukaan rakennuksen verkkoon syöttämä energia voisi parantaa E-lukua tietyin rajoituksin.

Lämpöverkko siis mahdollistaa hyvin energiatehokkaan rakennuksen tuottaman ylijäämälämmön syöttämisen verkkoon. Ylijäämälämpö voidaan syöttää verkon kautta esimerkiksi lämpövarastoon tai hyödynnettäväksi muissa rakennuksissa.

Energiaverkko edistää myös alueellisesta energiaomavaraisuutta, sillä se tuo joustavuutta hajautettujen lämmönlähteiden käyttöön alueen sisällä. Lämpöä voidaan käyttää siellä missä se on tarpeen kunakin ajanhetkenä.

Rakennusten ja teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen muissa rakennuksissa mahdollistuu. Lämpöä voidaan tuottaa siellä, missä on tilaa ja tuotolle otolliset olosuhteet. Mikäli energiaomavarainen alue on liitetty muuhun alueeseen lämpöverkon avulla, tämä lisää energiankäytön joustavuutta.

Rakennuskohtaisten lämpöjärjestelmien käyttö on tehokkaampaa, mikäli niitä voidaan hyödyntää muissakin rakennuksissa. Esimerkiksi rakennuskohtainen aurinkolämpö tuottaa helposti lämpöä yli oman kulutuksen erityisesti kesäaikaan. Tällöin lämpöverkon avulla lämpöä voidaan siirtää sinne missä kulutusta on tai alueelliseen lämpövarastoon. [20] Maalämpöjärjestelmäinvestointia taas voidaan hyödyntää muissakin rakennuksissa, mikäli sen tuottama lämpö voidaan syöttää myös lämpöverkkoon.

Energiaomavaraisen alueen lämmöntuotanto perustuu hajautettuun lämmöntuotantoon. Lämpöverkon muodostaman lämpöjärjestelmän lämmöntuotto voi olla joko keskitettyä tai hajautettua. Jos kaikki kuluttajat ja tuottajat ovat samassa verkossa, johon syötetään ja josta otetaan lämpöä, voidaan puhua avoimesta tai älykkäästä lämpöverkosta. [45]

### **6.2.1 Keskitetyt varastointimahdollisuudet**

Lämpöverkko mahdollistaa useiden rakennusten yhteisen lämpövaraston. Yhteiset keskitetyt varastot edistävät erityisesti alueellista energiaomavaraisuutta. Varastojen keskittämisestä seuraa monta alueellista hyötyä:

- 1) lämpöhäviöt tuntuvaan lämpöön perustuvissa varastoissa pienenevät [19],
- 2) varastoja voidaan käyttää joustavammin siellä, missä kulutustarvetta on ja
- 3) varastoja ei tarvitse mitoittaa kutakin rakennusta tai lämmitysyksikköä varten erikseen, vaan yhteisten tuotanto- ja kulutusprofiilien mukaan.
- 4) Keskitetyt varastot voidaan rakentaa sinne, missä on tilaa ja
- 5) investointikustannukset voivat suurissa varastoissa olla pienemmät kuin vastaavan kapasiteetin omaavissa pienissä varastoissa yhteensä.

### **6.2.2 Perus- huippu- ja varalämpötehon kattaminen**

Lämpöverkon muodostamassa järjestelmässä eri lämmönlähteillä voi olla erilaiset ”roolit” lämmöntuotannossa. Tällöin näiden roolien täyttämiseen ei tarvita joka talossa omaa lämmitysjärjestelmää. Kuten luvussa 3.1.2 on kerrottu, maalämpöä ja pien-CHP:ta on luontevinta käyttää perustehona. Kaikki saatava aurinkolämpö ja hukkalämpö kannattaa käyttää tai ottaa talteen. Aurinko- ja hukkalämmön tuottoa ei kuitenkaan yleensä voida säätää, ainoastaan ennustaa. Lämpökeskuksia ja lämpövarastoja voidaan käyttää säädettävänä huipputehona, jolla katetaan paitsi kulutuksen myös tuotannon ja näiden välisten erojen vaihtelut.

Lämpöverkko mahdollistaa eri lämmöntuotantotarpeiden kattamisen ja suunnitellun alueellisesti, vaikka hajautetun lämmöntuotannon muodot olisivatkin pienemmän mittakaavan yksiköitä, kuin perinteisessä keskitetyssä järjestelmässä. Ainoastaan rakennuskohtaisessa lämmityksessä taas rakennuskohtaisen lämmitysjärjestelmän tai -järjestelmien on katettava lämmön perustehon tarve, huipputehon tarve ja varatehon tarve.

### **6.3 Lämpöverkon merkitys hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämisessä**

Lämpöverkko voi toimia hyvin merkittävässä roolissa älykkäässä energiasjärjestelmässä. Lämpöverkolla on siis keskeinen merkitys myös hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvassa järjestelmässä ja lämpöverkko voi tukea näitä tuotantomuotoja. Kuitenkin tämä vaatii, että verkon ja nykyisen kaukolämpöjärjestelmän on kehitettävä radikaalistikin, esimerkiksi verkon lämpötilatasoa on laskettava. [1]

Lämpöverkko mahdollistaa suuremman mittakaavan hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämisen. Esimerkiksi aurinkokeräinkenttien [1], pien-CHP-laitosten hyödyntäminen useassa rakennuksessa ja rakennuksissa syntyvän hukkalämmön hyödyntäminen [1] mahdollistuu, kun rakennusten välillä on lämpöverkko

Hajautetun lämmöntuotannon sijoittelusta ja tilankäytöstä tulee lämpöverkon ansiosta joustavampaa. Pien-CHP-laitokset ovat tilaa vieviä ja polttoaineenkuljetus niihin asettaa vaatimuksia sijainnille. Maalämmön hyödyntäminen on mahdollista vain sopivassa maaperässä paikoissa, joissa kaivojen poraamiseen on tilaa. Aurinkolämpöä saadaan laajemmin käyttöön, mikäli aurinkokeräimiä voidaan asentaa rakennusten kattojen lisäksi suurempiin aurinkokeräinkenttiin.

Lähes kaikissa hajautetun lämmöntuotannon muodoissa suuremmat tuotantoyksiköt pienentävät tuotetun lämmön yksikkökustannuksia. Lämpöverkon merkitystä lämmöntuotantomuotojen hyödyntämiseen tarkastellaan seuraavaksi tuotantomuotokohtaisesti.

### 6.3.1 Maalämpö

Maalämmön hyödynnettävyys riippuu voimakkaasti sijainnista. Maalämpöpotentiaaliin ja maalämmön hyödyntämiskustannuksiin vaikuttavat maaperän ominaisuudet eli maapeitepaksuus ja kallioperän lämmönjohtavuus. Lisäksi maanalaiset tunnelit ja rakennelmat voivat estää tai vaikeuttaa maalämmön hyödyntämistä paikallisesti.

Rakennuskohtaiset järjestelmät olemassa oleviin rakennuksiin eivät olekaan kaikilla mahdollisia tilanpuutteen tai sopimattoman maaperän takia. Uudisrakentamisen yhteydessä maalämmön rakentamiseen on enemmän vaihtoehtoja, mutta maalämpö ei uudisrakennuskohteissakaan aina ole mahdollinen vaihtoehto.

Lämpöverkko mahdollistaakin maalämpökentän rakentamisen sinne, missä on tilaa ja kentälle sopiva maa- ja kallioperä. Tällöin keräinkenttää ei ole välttämätöntä sijoittaa minkään rakennuksen yhteyteen, vaan usea rakennus voi hyödyntää kenttää.

Maalämmön kustannuksissa investointikustannus on hyvin merkittävä, sillä käyttökuluja ovat ainoastaan pumpun käyttämä sähkö ja erilaiset huolto- ja ylläpitokulut. Tällöin investoinnin mahdollisimman tehokas käyttäminen on tärkeää. Lämpöverkko mahdollistaa maalämmön hyödyntämisen useassa rakennuksessa joustavasti lämmöntarpeen mukaan.

Tätä lämpöverkon vaikutusta on tutkittu soveltaen Otaniemeen. Tulosten mukaan lämpöverkon hyödyntäminen vähentää toissijaisen lämmönlähteen tarvetta.

### 6.3.2 Pien-CHP

Sähköä ja lämpöä tuottavien CHP-laitosten kohdalla suurten laitosten etu pieniin verrattuna on parempi hyötysuhde. Esimerkiksi polttomoottoreiden kokonaishyötysuhde kokoluokassa alle 200 kW on 75-85 % ja kokoluokassa 2-10 MW 85-90 %, kuten luvussa 2.1.7 taulukossa 1 on esitetty.

Hyötysuhde vuorostaan vaikuttaa sähkön ja lämmön yhteistuotannon tuotantokustannuksiin. Vaikutuksen suuruus riippuu kuitenkin teknologiasta. IPCC:n raportin mukaan muuntohyötysuhde vaikuttaa merkittävästi erityisesti biomassaa käyttävien höyryturbiini-CHP-laitoksien investointikustannukset huomioiviin lämmöntuotantokustannuksiin. Nämä ns. tasoitettut lämmöntuotantokustannukset voivat vaihdella höyryturbiinilaitoksissa 20:stä 50:een USD/MJ ainoastaan hyötysuhteen muutoksen vaikutuksesta. Toisaalta jätettä polttavan CHP-laitoksen lämmöntuotantokustannukset vaihtelevat hyötysuhteen vuoksi vain n. 18:sta 20:een USD/MJ, eli vaihteluväli on vain n. 2 USD/MJ. Raportissa kunkin tuotantokustannuksiin vaikuttavan tekijän merkitystä on tutkittu siten, että kaikki muut tekijät on pidetty keskimääräisissä arvoissaan ja yhden tekijän arvoja muutettu. [80]

Suuremman laituskoon vaikutusta investointikustannuksiin eli CHP-laitoksen mitataakaavaetua voidaan arvioida ns. teholaan avulla. Tätä lakia on sovellettu myös IPCC:n uusiutuvan energian kuluja ja hyötysuhteita käsittelevässä raportissa. [80] Teholaki on esitetty kaavassa (24):

$$Investointi/MW_{laitos\ 2} = Investointi/MW_{laitos\ 1} \left( \frac{koko\ 2}{koko\ 1} \right)^{n-1}, \quad (24)$$

jossa  $n$  voi olla  $0 \dots 1$  ja riippuu CHP-teknologiasta. Mitä suurempi  $n$ , sitä vähemmän kokoluokan kasvattamisella on vaikutusta investointikuluihin. IPCC:n raportissa on käytetty arvoja  $0,7$  ja  $0,9$  teknologiasta riippuen. Näillä  $n$ :n arvoilla laskettuna investoinnin koon viisinkertaistaminen pienentäisi rakennettua tehoa kohden investointikuluja  $15 \dots 39\ %$ .

CHP-laitokselle tilan löytäminen taajamassa on helpompaa, mikäli laitoksen ei tarvitse olla lämpöä kuluttavan rakennuksen välittömässä läheisyydessä. Useassa tapauksessa onkin käytännössä mahdotonta löytää joidenkin rakennusten välittömästä läheisyydestä riittävästi tilaa pien-CHP-laitokselle.

### 6.3.3 Aurinkolämpö

Lämpöverkko mahdollistaa usean rakennuksen yhteisessä käytössä olevien aurinkokeräinkenttien rakentamisen. Lämpöverkko myös mahdollistaa rakennuskohtaisen aurinkolämpöjärjestelmien käytön joustavasti muissakin rakennuksissa kuluksen mukaan. Nämä seikat ratkaisevat monia ongelmia ja niistä seuraa etuja, joita eritellään seuraavaksi.

Aurinkolämmön tuottamiseen liittyy usein mittakaavaetu. Mitä suurempi järjestelmä on, sitä pienemmät ovat kustannukset tuotettua lämpöä kohden.

Esimerkiksi Eurosun konferenssijulkaisussa julkaistussa tutkimuksessa tuloksena löydettiin aurinkolämpöjärjestelmillä merkittävä mittakaavaetu: aurinkolämmön kulut tuotettua lämpöenergiaa kohden puolittuivat kun järjestelmän koko kymmenkertaistui. Tarkemmin tulokset on esitetty taulukossa Taulukko 9. Aurinkolämpöjärjestelmien tuotantokustannuksissa on eräässä aurinkokeräinkenttiä simuloivassa tutkimuksessa löydetty mittakaavaetu. Tutkimuslähdeviite: 9.

*Taulukko 9. Aurinkolämpöjärjestelmien tuotantokustannuksissa on eräässä aurinkokeräinkenttiä simuloivassa tutkimuksessa löydetty mittakaavaetu. Tutkimuslähdeviite: [81]*

Lämmitystarve kWh/a	Aurinkokeräimen pinta-ala m <sup>2</sup>	Aurinkolämmön tuotantokust. €/kWh
<b>581</b>	95	0.2319
<b>1 453</b>	237,5	0.1685
<b>2905</b>	475	0.1348
<b>4356</b>	712,5	0.1191
<b>5810</b>	950	0.1097

Tutkimuksessa tutkittiin simuloinnin ja kustannuslaskennan avulla erikokoisten suuren mittakaavan aurinkokeräinkenttien ja pitkäaikaisten lämpövarastojen käyttöä lämpimän käyttöveden ja lämmityksen tuottamiseen Espanjassa. Tarkastelluissa

systeemeissä lämmönkulutus vaihteli 581...5810 MWh:iin vuodessa. Kussakin simuloidussa tapauksessa aurinkokeräinten pinta-ala suhteessa koko lämmönkulu-  
tukseen pidettiin vakiona. [81]

Mittakaavaetu voi vähentyä, mikäli aurinkolämmön osuus kasvaa niin paljon, että suurimman tuoton aikaan syntyy ylijäämälämpöä, jota ei saada varastoitua ja keräimen lämpötila nousee. Tällöin lämpötilan nousu alentaa keräimen hyötysuhdetta ja siten vähentää hyödynnettävän energian määrää verrattuna pienemmän mitoituksen tapaukseen. Aurinkolämpöjärjestelmän suunnittelu onkin haastavaa vain yhdelle talolle, sillä tuotantoa ei voida säätää kulutuksen mukaan. Sen sijaan useamman talon järjestelmässä tuotettua lämpöä voidaan joustavammin ohjata sinne, missä lämpöä kuluu.

Esimerkiksi Otaniemen tutkijahotelli Aalto Innissä on oma aurinkolämpöjärjestelmä, joka on mitoitettu käytettäväksi lämpimän käyttöveden tuottoon. Järjestelmä tuottaa toisinaan kesällä liikaa lämmintä käyttövettä, ja kiinteistön oma lämpimän veden varastokapasiteetti ei riitä. Lämpöverkon avulla aurinkokeräinten tuottama lämpö voitaisiin ohjata muihin kiinteistöihin, esimerkiksi läheisiin opiskeli-  
joille suunnattuihin asuinrakennuksiin tai liikuntakeskukseen.

Kaikkialla ei ole mahdollista rakentaa rakennuskohtaisia katolle asennettuja aurinkokeräimiä. Esimerkiksi rakennuksen suojeltu arkkitehtuuri tai katon rakenne ja muoto voivat estää tai haitata merkittävästi aurinkokeräinten asentamista. Tällöin lämpöverkko mahdollistaa aurinkolämmön hyödyntämisen usean rakennuksen yhteiskäytössä olevien aurinkokeräinkenttien avulla.

## 7 Johtopäätökset

### 7.1 Tulosten pohdinta

Työn tavoitteena oli tutkia lämpöverkon merkitystä hajautetun lämmöntuotannon kannalta. Työssä tutkittiin lämpöverkon ja hajautettujen lämmöntuotannon muotojen ominaispiirteitä. Tuloksena saatiin selville lämpöverkon merkitys ja keskeiset ominaisuudet hajautetun lämmöntuotannon kannalta.

Työn tuloksena huomattiin, että lämpöverkko voi edistää hajautetun lämmöntuotannon muotojen käyttöä. Lämpöverkko myös tukee koko lämpöjärjestelmän käyttöä ja energiatehokkuutta.

Energian siirtotarve rakennusten ja alueiden välillä ei vähene, vaikka lähes nolla-energiarakentaminen yleistyy. Energiaomavaraisuus ei tarkoita teho-omavaraisuutta. Toisin sanoen talokohtaisilla järjestelmillä ei pyritä jatkuvaan talokohtaiseen energiantuotannon ja kulutuksen yhtäaikaaisuuteen, vaan järjestelmät pyrkivät kulluttamaan vuoden aikana saman määrän energiaa kuin ne tuottavat.

Lämpöverkon hyödyntämisen laajamittaisesti hajautetussa lämmöntuotossa mahdollistaa avoin lämpöverkko. Tällaista on mm. Suomessa tutkittu [59, 45, 60] ja Suomessa ja Ruotsissa [67, 82] myös testattu.

Lämpöverkko ja lämmöntuotantolaitokset ovat usein investointipainotteisia. Lisäksi lämpöenergian siirto ja lämpöenergian tuottaminen on lain mukaan saman toimijan vastuulla. Tällöin lämpöverkon hallinnoija on luonnollisessa monopoli asemassa. Esimerkiksi toimijalla voi olla tarve myydä nykyisten yhteistuotantolaitosten lämpöä lämpöverkkonsa kautta. Tämä asettaa haasteensa laajamittaiseen hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvan avoimen lämpöverkon syntymiselle.

Lämmönkulutuksen väheneminen ja hajautetun lämmön tuotannon lisääntyminen asettaa toisaalta haasteen nykyiselle kaukolämpöjärjestelmälle. Lisäksi kaukolämmön kilpailijaksi on noussut mm. maalämpö, jota käytetään lämmitysjärjestelmänä myös kaukolämpöalueella.

On mahdollista, että energianjakelijan ja energiantuottajan roolit tulevat eriytymään tulevaisuudessa vastaavalla tavalla kuin sähköntuotannossa. Energian tuottajan ja jakelijan roolien eriyttäminen lisääisi kilpailua lämmön tuotannossa. Tällöin lämpöverkon hyödyntäminen hajautetussa lämmöntuotannossa olisi mahdollista laajamittaisesti. Tällainen muutos vaatii kuitenkin jatkotutkimusta.

Lainmuutos voisi esimerkiksi heikentää nykyisten CHP-laitosten kannattavuutta. Tämä olisi Suomessa epäedullista, sillä Suomessa halutaan lisätä biomassojen käyttöä polttoaineena ja yhteistuotantolaitoksissa niiden käyttö on järjestelmän energiatehokkuuden kannalta hyödyllistä.

Tässä työssä on eritelty lukuisia eri tapoja kysynnän ja tarjonnan tasaamiseen lämpöjärjestelmässä. Mikäli verkon ylläpidon ja lämmöntuotannon roolit eriytyvät, tarvitaan myös tuotantokoordinaattori, jonka tehtävä olisi lämmön kysynnän ja tarjonnan tasapainon hallinnointi. Tämä rooli voisi esimerkiksi luontevasti sopia lämpöverkon ylläpitäjälle, jolla olisi tietotaito sekä lämmitysjärjestelmistä että lämmöntuotannosta.

Työssä tehty päätelmä, että lämpöverkko on merkittävä osa hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvaa järjestelmää, on yhtenevä esimerkiksi Tanskan kaukolämpöalan 4. sukupolven kaukolämpö -tutkimusprojektiin liittyvien julkaisujen kanssa. 4. sukupolven kaukolämmön idean ytimessä onkin, että kaukolämpö tukee uusiutuviin energianlähteisiin perustuvaa järjestelmää [1].

Toisaalta Tanskassa tilanne on eri kuin Suomessa, sillä Tanskassa useimmiten kaukolämpöalueella kaukolämpöön liittyminen on pakollista [57]. Tutkimusten taustalla voikin osittain olla tarve perustella tätä asemaa tulevaisuudessakin. Vaikka tällainen motivaatio 4. sukupolven kaukolämpötutkimuksen takaa löytyisikin, ei tutkimustuloksissa sinällään ole tämän työn valossa epäilyttäviä piirteitä. Lisäksi tutkimukset on julkaistu vertaisarvioituissa julkaisuissa.

Työssä tehty päätelmä lämpöverkon lämpötilatason merkityksestä esiintyy useissa aiheeseen liittymissä tutkimuksissa. Kanadassa tehty simulointiin perustuva tapaus-tutkimus mahdollisesta uusiutuvaa energiaa ja hukkaenergianlähteitä laajasti hyödyntävästä lämpöverkosta osoitti, että sopivin verkko tehdyillä oletuksilla olisi keskilämpötilainen verkko, jossa meno- ja paluulämpötilat olisivat 90 ja 40 celsiusastetta. Tämän verkon lämpötilaa voitaisiin myöhemmin alentaa, mikäli energiankulutus tippuu. Tanskan 4. sukupolven lämpöverkon keskeinen ajatus on alentaa verkon jakelulämpötilaa jopa 50-60 celsiusasteeseen [68] lämpöhäviöiden ja hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämisen vuoksi. Kiinan teollisuuden hukkalämpöä tutkivassa tutkimuksessa todettiin matalamman lämpötilan parantavan hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia.

## **7.2 Suositukset**

### **7.2.1 Suositukset Otaniemessä**

Nykyisen kaukolämpöverkon hyödyntäminen myös hajautettuun lämmöntuotantoon on Otaniemessä todennäköisesti mahdollista. Koska lämpöverkon voidaan katsoa olevan merkittävä tekijä esimerkkikohteen Kiinteistöyhtiön energiaomavaraisuustavoitteen kannalta, yhteistyö nykyisen lämpöverkon haltijan kanssa on tärkeää. Tämä mahdollistaisi yhteisen lämmitysjärjestelmän kehittämisen kustannustehokkaasti.

Hajautetun lämmöntuotannon hyödyntäminen lämpöverkossa kuitenkin vaatii, että lämmöntuotto voidaan kytkeä verkkoon ja lämmöntuottaja saa siitä riittävän korvauksen. Samoin investointien jakamisen olisi oltava oikeudenmukaista. Onkin syytä kehittää yhdessä sopivaa liiketoimintamallia. Haasteena onkin löytää sellainen investointi- ja ansaintamalli, jossa molemmat osapuolet hyötyvät.

Avoimen lämpöverkon syntymiseen Otaniemessä tuo haastavuutta se, että lämpöverkon omistaja on määräävässä markkina-asemassa. Tämä toimija ei välttämättä lyhyellä tähtäimellä hyödy hajautetun lämmöntuotannon lisääntymisestä verkossa. Tällöin tahtotilaa tasapuoliseen yhteistyöhön ei välttämättä löydy.

Pidemmällä tähtäimellä energiajärjestelmä voi kuitenkin muuttua ja talojen lämmitysenergian tarve vähentyä. Toimiva yhteistyö ja uusien lämmöntuotantotapojen hyödyntäminen voi tällöin osoittautua lämpöyhtiönkin kannalta edulliseksi.

Hajautetun lämmöntuotannon kannalta Otaniemen verkon lämpötilan alentamismahdollisuuksia on hyödyllistä tutkia. Kaiken kaikkiaan Otaniemen tulevaa lämpöenergian hankintaa kannattaa tarkastella kokonaisuutena eikä ainoastaan rakennus kerrallaan. Tällöin erilaiset paikalliset energiantuotantomuodot voivat täydentää toisiaan.

### **7.2.2 Suositukset yleisesti**

Hajautettu lämmöntuotanto edistää energiaomavaraisuutta ja voi auttaa ilmastomuutoksen hillinnässä, riippuen järjestelmästä, johon verrataan. Hajautettu lämmöntuotanto myös edistää kilpailua lämpömarkkinoilla, mikä taas voi laskea lämmön hintaa kuluttajille. Hajautettu lämmöntuotanto voi palvella energiajärjestelmää paremmin, jos se on osa lämpöverkkoa. Näistä syistä hajautetun lämmöntuotannon hyödyntämistä lämpöverkossa pitäisi edistää. Edistämiskeinoja voivat olla esimerkiksi

Vaikka tulevaisuudessa energiantuotannon painopiste muuttuisi kohti paikallisia tuotantotapoja, ei tämä kehitys poista tulevaisuudessakaan tarvetta lämpöverkolle. Päinvastoin lämpöverkon merkitys tulee korostumaan hajautettua lämmöntuotantoa tukevana osana energiajärjestelmää.

Tästä syystä onkin tärkeää, että kaukolämpöjärjestelmää kehitetään avoimempaan suuntaan. Tällöin lämpöverkkoa voidaan hyödyntää myös tulevaisuudessa tukemaan hajautettua lämmöntuotantoa.

Tulevaisuudessa lämpöverkon ja lämpöjärjestelmän suunnittelussa on mukana nykyistä enemmän tahoja. Hajautettua tuotantoa suunnittelee nykyistä useampi osapuoli. Toisaalta hajautettuun tuotantoon perustuvan lämpöjärjestelmän luominen vaatii integroitua suunnittelua. Energiajärjestelmän suunnittelussa keskeistä on, että energian säästöä ja energian kulutusta suunnittelevat tahot tekevät yhteistyötä. [1]

## **7.3 Jatkotutkimus**

Kuten tutkimuksessa on tullut esille, useiden hajautetun lämmöntuotannon teknologioiden, kuten aurinkolämmön, maalämmön ja hukkalämmön hyödyntäminen on tehokkaampaa, mikäli lämpötilataso on nykyistä lämpöverkon lämpötilatasoa alhaisempi. Lämpöverkon lämpötilan alentamismahdollisuuksia on tutkittu yleisellä tasolla Suomessa eri tutkimuksissa [73, 51].



Kuitenkin lämpötilan alentamista on tutkittava tarkemmin tapauskohtaisesti, kun hajautettua lämmöntuotantoa halutaan lisätä lämpöverkkoon. Lämpöverkon lämpötilan alentamismahdollisuuksia olisikin syytä tutkia myös Otaniemessä.

Alentamismahdollisuuksia rajoittavat kasvavat painehäviöt, verkon tehonsiirto-kyky ja rakennusten mahdollisuus saada riittävästi lämpöä matalamman lämpötilatason menovedestä. Näiden tekijöiden todelliset vaikutukset olisikin tarpeellista selvittää Otaniemessä, mikäli lämpötilaa halutaan laskea ja tämä vaatii jatkotutkimusta.

Mikäli lämpötilan alentaminen lämpöverkossa aiheuttaisi merkittäviä lisäinvestointeja verkkoon, rakennusten lämmönsiirtimiin tai välipumppaamoihin, on lämpötilan laskun hyötyjä tarkasteltava kustannusten ja kustannushyötyjen näkökulmasta. Näin voidaan etsiä optimaalinen lämpötila, jossa toisaalta taloudellinen tehonsiirto ja riittävä lämmönsaanti taataan siten, että hajautetun lämmöntuotannon hyödyntäminen koko lämpöverkossa mahdollistuu.

Otaniemessä olisi hyödyllistä yhteisen liiketoimintamallin kehittäminen verkkoa hallinnoivan yhtiön kanssa. Liiketoimintamalli tulisi kehittää niin, että molemmat osapuolet voivat hyötyä. Tällöin lämpöyhtiö ei menetä asiakastaan Kiinteistöyhtiötä ja Kiinteistöyhtiö voi hyödyntää lämpöverkkoa energiaomavaraisuustavoitteen saavuttamisessa.

Maalämpöjärjestelmälle tehtyä laskelmaa voisi laajentaa Otaniemen asuintaloihin. Tällöin oletettavasti lämpöverkon hyödyt korostuvat, sillä asuintalojen lämmön kulutusprofiilit poikkeavat Kiinteistöyhtiön omistamien toimisto- opetus- ja tutkimuskäytössä olevien rakennusten kulutusprofiileista.

Maalämmölle tehdyn laskelman lisäksi aurinkolämmölle voitaisiin tehdä vastaava laskelma. Tällöin päästäisiin kiinni lämpöverkon merkityksestä hyödynnettäessä sellaista lämmöntuotantoa, jota ei voida säätää.

Otaniemessä olisi hyötyä lämpövarastosta hajautetun lämmöntuotannon ja kulutuksen erojen tasauksessa ja lämmöntuotantomuotojen optimaalisen käytön kannalta. Lämpövaraston sopivaa kokoa ja sijaintipaikkaa olisi hyvä selvittää investointikustannusten ja saavutettavien hyötyjen näkökulmasta.

Lämmön tuotannon ja jakelun roolien eriyttäminen lainsäädännön avulla voisi edistää hajautettujen lämmöntuotantomuotojen kytkemistä lämpöverkkoon. Tämä vaatisi kuitenkin jatkotutkimusta, jotta lainsäädännön muuttamisesta seuraavat hyödyt ja haitat saataisiin selville.

Lämmön tuotannon kilpailun edistämiseksi lämmön tuottajat voitaisiin myös velvoittaa ostamaan hajautettua tuotantoa tai netottamaan eli hyvittämään myytyä lämpöä verkkoon ostetulla lämmöllä. Tämän toteutustapoja ja lämmön arvon määrittämisestä pitäisi tutkia lisää. Lisäksi tästä voi seurata verkon tuotannon hallinnoinnin kannalta lukuisia haasteita, joiden ratkaiseminen myös kaipaa selvitystä.

## Lähteet

## 8 Lähdeluettelo

- [1] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund ja B. V. Mathiesen, ”4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,” *Energy*, nro 68, 2014.
- [2] Energiateollisuus ry, ”Kaukolämpöjärjestelmä,” tekijä: *Kaukolämmön käsikirja*, osa/vuosik. 2, Helsinki, 2006.
- [3] Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), ”Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers,” 2014.
- [4] Tilastokeskus, ”Energian kokonaiskulutus ja polttoaineiden käytön hiilidioksidipäästöt,” 2014.
- [5] Tilastokeskus, ”Tilasto: ENergian loppukäyttö sektoreittain,” 2013.
- [6] Euroopan komissio, ”Eurooppa 2020 -tavoitteet,” 2011. [Online]. [http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/targets\\_fi.pdf](http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/targets_fi.pdf). [Haettu 6 11 2014].
- [7] Euroopan parlamentti, *Energy performance of the buildings directive*, 2010.
- [8] FinZEB -työryhmä, ”FinZEB-hankkeen keskeiset johtopäätökset,” 2015.
- [9] Aalto-yliopistokiinteistöt Oy, ”Vuosikertomus ja yhteiskuntavastuuraportti,” Espoo, 2013.
- [10] Aalto-yliopistokiinteistöt Oy, ”openenergy.fi,” 8 2014. [Online]. <http://openenergy.fi/fi/tavoitteet>. [Haettu 3 11 2014].
- [11] Energiateollisuus ry, ”Kaukolämmön hinnat tyyppitaloissa eri paikkakunnilla,” 10 2014. [Online]. <http://energia.fi/tilastot/kaukolammon-hinnat-tyyppitaloissa-eri-paikkakunnilla>. [Haettu 6 11 2014].
- [12] Fortum Oyj, ”Combined heat and power production in Finland,” [Online]. <http://www.fortum.com/en/energy-production/combined-heat-and-power/finland/pages/default.aspx>. [Haettu 6 11 2014].
- [13] Fortum Oyj, ”Fuels,” [Online]. <http://www.fortum.com/en/energy-production/fuels/pages/default.aspx>. [Haettu 6 11 2014].
- [14] Energiamarkkinavirasto, ”Keromus maakaasun toimitusvarmuudesta,” 2013.
- [15] S. Helynen, S. Kärkkäinen, K. Sipilä ja M. Paterson, ”Efficiency in energy production, transfer and distribution,” tekijä: *Energy use - Visions and Technology Opportunities in Finland*, osa/vuosik. 3, Helsinki, Edita Prima Ltd., 2007.
- [16] Kilpailu- ja kuluttajavirasto, ”Kilpailuvirasto tiedotteita,” 16 1 2012. [Online]. Kilpailuvirasto lopetti tällä erää kaukolämpöalaa koskevat selvityksensä. [Haettu 6 11 2014].
- [17] Motiva, Gaia Consulting Oy, ”Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla,” 2010.

- [18] E. Vartiainen, P. Luoma, J. Hiltunen ja J. Vanhanen, ”Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO<sub>2</sub> -päästöt,” Gaia Group Oy, Helsinki, 2002.
- [19] ”Energy Transmission and Storage,” tekijä: *Renewable Energy - Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics & Planning*, Academic Press Elsevier, 2011.
- [20] Granlund Oy / Erja Reinikainen, ”FinZEB -hanke Energiatuotantoketjut - Aineistoselvitys 2014,” Helsinki, 2014.
- [21] T. Karjalainen, ”Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönnotto,” Kajaani, 2012.
- [22] Energiateollisuus ry, ”Lämmön hankinta,” tekijä: *Kaukolämmön käsikirja*, osa/vuosik. 6, 2006.
- [23] ”KCORG Science & Tech,” [Online]. <http://www.kcorc.org/en/science-technology/advantages/>. [Haettu 14 11 2014].
- [24] S. A. Kalogirou, ”Solar Energy Collectors,” tekijä: *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Academic Press, 2009.
- [25] JTV-energia, ”JTV-energian CPC keräin,” [Online]. <http://www.jtv-energia.fi/cpc-tyhjioputki.html>. [Haettu 17 10 2014].
- [26] Solarfocus, ”Solarfocus CPC collector,” [Online]. <http://www.solarfocus.eu/products/solar-energy-systems/hot-water-and-heating/cpc-collector/cross-section/>. [Haettu 17 10 2014].
- [27] National Renewable Energy Laboratory, ”Parabolic trough,” [Online]. <http://images.nrel.gov/viewphoto.php?imageId=6323474>. [Haettu 17 10 2014].
- [28] Wikipedia, ”Solar tracker, Parabolic dish,” [Online]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_tracker](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tracker). [Haettu 17 10 2014].
- [29] *Heliostat field in Australia*. [Art].
- [30] Rakennustietosäätiö; Ilmatieteenlaitos, ”Rakennustietokortti RT 055.30 Ilmasto, säteily,” 1976.
- [31] K. Komulainen, ”Aurinkolämpö – teknologia ja mahdollisuudet,” Jyväskylä, 2006.
- [32] ”Solvärmedata,” [Online]. <http://www.solvarmedata.dk/>. [Haettu 7 11 2014].
- [33] P. Sorknäs, ”Distributed CHP plants in renewable energy systems,” tekijä: *3rd 4DH Annual Conference*, Ålborg, 2014.
- [34] Brædstrup fjernvarme a.m.b.a., ”Fakta,” [Online]. <http://www.braedstrup-fjernvarme.dk/side1303.html>. [Haettu 14 10 2014].
- [35] Gaia Consulting Oy, ”Energiaomavarainen Otaniemi 2030,” 2014.
- [36] Motiva Oy, ”Maalämpö,” [Online]. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/lampopumput/lampopumputeknologi/maalampo](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumputeknologi/maalampo). [Haettu 8.9.2014 9 2014].

- [37] D. Banks, Introduction to Thermogeology : Ground Source Heating and Cooling (2nd Edition), John Wiley & Sons, 2012.
- [38] Euroopan parlamentti ja neuvosto, *Direktiivi 2009/28/EY uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energiankäytön lisäämisestä*, Brysseli, 2009.
- [39] Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, *D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskenta*, 2013.
- [40] S. Nielsen ja B. Möller, "Excess heat production of future net zero energy buildings within district heating," *Energy*, nro 48, 2012.
- [41] Energiateollisuus ry, "Kaukojäähdytys," tekijä: *Kaukolämmön käsikirja*, osa/vuosik. 15, 2005.
- [42] F. Hao, X. Jianju, Z. Kan, S. Yingbo ja Y. Jiang, "Industrial waste heat utilization for low temperature district heating," *Energy Policy*, nro 62, 2013.
- [43] WSP Finland Oy, "Espoon uusiutuvan energian rajattu kuntakatselmus," Espoon kaupunki, Espoo, 2012.
- [44] M. Pihlava, "Tekniikka ja Talous," 8 12 2010. [Online]. <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/tietokonesali+alkaa+lammittaa+espoo+laiskoteja/a541640>. [Haettu 19 8 2014].
- [45] Gaia Consulting Oy / Pesola, Aki; Bröckl, Marika; Vanhanen, Juha, "Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet," 2011.
- [46] P. Lamberg ja K. Sirén, "Lämpöpumppu ja kylmäkone termisen energian varastoinnissa," tekijä: *Termisen energian varastoinnin hyväksikäyttömahdollisuudet rakennusten lämmityksessä ja jäähdytyksessä*, osa/vuosik. 4, Espoo, Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio, 1997, p. 1.
- [47] A. Pönkä, "Faasimuutosmateriaalien käyttö energian varastoinnissa," Tampere, 2012.
- [48] R. W. Y. L. J. Xu, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage," osa/vuosik. Vol 103, pp. 610-638, 2014.
- [49] J. Paalanen ja K. Sirén, "Termisen energian varastoinnin hyväksikäyttömahdollisuudet rakennusten lämmityksessä ja jäähdytyksessä, osa 1 Varastointitekniikat - Tilannekatsaus," Espoo, 1997.
- [50] Energiateollisuus ry, "Lämmön varastointi ja lämpöakut," tekijä: *Kaukolämmön käsikirja*, osa/vuosik. 8, 2005.
- [51] T. Mäkelä, "Kaukolämpöverkon käyttölämpötilan alentamismahdollisuudet," Lämpölaitosyhdistys ry., 1985.
- [52] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, *Kaukolämmön käsikirja*, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, p. 534.
- [53] Energiateollisuus ry, "Lämmön siirto ja jakelu," tekijä: *Kaukolämmön käsikirja*, osa/vuosik. 5, Helsinki, 2006.

- [54] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, Kaukolämmön käsikirja, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, pp. 530-559.
- [55] Energiateollisuus ry, ”Julkaisu K1/2013, Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet,” 2013.
- [56] Energiateollisuus ry, ”Rakennusten lämmitys ja lämmön kulutus,” tekijä: *Kaukolämmön käsikirja*, osa/vuosik. 3, 2006.
- [57] B. O. G. Mortensen, ”Udtrædelsesgodtgørelse,” Oslos yliopisto, 2013.
- [58] H. Lund, A. N. Andersen, P. A. Østergaard, B. V. Mathiesen ja D. Connolly, ”From electricity smart grids to smart energy systems – A market operation based approach and understanding,” *Energy*, osa/vuosik. 42, nro 1, pp. 96-102, 2012.
- [59] V. Niskanen, ”Avoin energiaverkko -konsepti ja rakennusten jäähdytysjärjestelmien hukkalämmön hyödyntäminen,” Aalto-yliopisto, Espoo, 2013.
- [60] T. Salminen, ”Avoimen kaukolämpöverkon ja CHP-laitoksen yhteistoiminnan vaikutusten dynaaminen simulointi,” 2013.
- [61] K. Klobut, A. Knuuti, S. Vares, J. Heikkinen, A. Laitinen, H. Ahvenniemi, H. Hoang, J. Shemeikka ja K. Sipilä, ”Tulevaisuuden kaukolämpöasuinalueen energiaratkaisut,” 2014.
- [62] K. Klobut, A. Knuuti, S. Vares, J. Heikkinen, M. Rämä, A. Laitinen, A. Hannele, H. Ha, S. Jari ja K. Sipilä, ”Tulevaisuuden kaukolämpöasuinalueen energiaratkaisut,” VTT, 2014.
- [63] Pöyry Oy, Energiateollisuus ry, ”Kaukolämmitysjärjestelmien keventämismahdollisuudet matalan energian kaukolämpöalueilla,” 2014.
- [64] Energiateollisuus ry, ”Rakennusten lämmitys ja lämmön kulutus,” tekijä: *Kaukolämmön käsikirja*, Helsinki, Energiateollisuus ry, 2006.
- [65] Pöyry Finland Oy, Energiateollisuus ry Kaukolämpö, ”Kaukolämmön lämmönjakokeskusten kytkennät ja lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat,” 2011.
- [66] D. Rosa, R. Boulter, K. Church ja S. Svendsen, ”District heating (DH) network design and operation toward a system-wide methodology for optimizing renewable energy solutions (SMORES) in Canada: A case study,” *Energy*, nro 45, pp. 960-974, kesäkuu 2012.
- [67] N. Wirgentius, haastateltava, *Haastattelu kysyntäjoustoön ja avoimeen lämpöverkkoon liittyen*. [Haastattelu]. 09 2014.
- [68] Dansk Fjernvarme, ”Etablering af lavtemperaturfjernvarme i eksisterende fjernvarmeforsyning,” [Online]. <http://www.danskfjernvarme.dk/viden-om/f-u-konto/2013-04-etablering-af-lavtemperaturfjernvarme-i-eksisterende-fjernvarmeforsyning>. [Haettu 14 10 2014].
- [69] Albertslund Forsyning; COWI, ”Etablering ar lavtemperaturfjernvarme i eksisterende fjernvarmeforsyning,” Dansk fjernvarmes F&U Konto, 2014.

- [70] A. Rabl, "Collector Concepts and Designs," tekijä: *Solar Collectors, Energy Storage and Materials*, osa/vuosik. 2, 1985.
- [71] C. C. Smith ja T. A. Weiss, "Design application of the Hottel-Whillier-Bliss equation," *Solar Energy*, osa/vuosik. 19, nro 2, pp. 109-113, 1977.
- [72] The Solar Keymark, "The Solar Keymark Database," [Online]. <http://www.solarkeymark.dk/CollectorCertificates>. [Haettu 23 1 2015].
- [73] H. Parkkinen ja C.-J. Fogelholm, "Kaukolämmön meno- ja paluulämpötilojen pudottamismahdollisuudet vanhoissa verkoissa," Espoo, 2001.
- [74] Ympäristöministeriö, "D1 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistot Määräykset ja ohjeet," Helsinki, 2007.
- [75] Energiateollisuus ry, "Kaukolämpötilasto 2013," 2014. [Online]. [http://energia.fi/sites/default/files/kaukolampotilasto\\_2013\\_web.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/kaukolampotilasto_2013_web.pdf). [Haettu 12 3 2015].
- [76] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, Kaukolämmön käsikirja, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, p. 374.
- [77] R. Martikainen, "Kaukolämpöverkon verkostohyötysuhteen parantaminen," 2013.
- [78] S. M. Kivelä, R. Nurmiainen ja M. Spåra, "Tilastomatematiikka," tekijä: *M niin kuin matematiikka - lukiotason matematiikan tietosanakirja*, Espoo, Teknillinen korkeakoulu, 2000.
- [79] T. Ojanen, "Lämpöhäviöiden määrittäminen kaukolämpöverkostossa - Puolustushallinnon rakennuslaitos," Mikkeli, 2014.
- [80] T. Bruckner, A. Chum, Å. Jäger-Waldau, L. Killington, J. Gutiérrez-Negrín, W. Nyboer, A. Musial ja Verbruggen, "Annex III: Cost Table. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change," Cambridge University Press, 2011.
- [81] M. A. Lozano, A. Anastasia, F. Palacin ja L. M. Serra, "Simulation study and economic analysis of large-scale solar heating plants in Spain," tekijä: *Eurosun 2010*, Graz, 2010.
- [82] Fortum Oyj, "Öppen fjärrvärme," 2013. [Online]. <http://oppenfjarrvarme.fortum.se/>. [Haettu 26. 9. 2014].
- [83] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, Kaukolämmön käsikirja, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, p. 68.
- [84] Helsingin Energia, "Rakennusten kaukojäähdytys, KJ1/2010 Yhtenäiset laatuvaatimukset, suositukset ja ohjeet," Helsinki, 2010.
- [85] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, Kaukolämmön käsikirja, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, p. 44.
- [86] Fortum Oyj, "Stockholm Royal Seaport - a smart grid for a sustainable city project," 2011.

- [87] "Energy system planning," tekijä: *Renewable Energy - Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics & Planning*, Academic Press Elsevier, 2011.
- [88] Talouselämä, "Miksi tätä ei kokeilla Espoossa? Fortum ostaa Tukholmassa asiakkaiden ylijäämälämpöä," 18 1 2013. [Online]. <http://www.talouselama.fi/uutiset/miksi+tata+ei+kokeilla+espoossa+fortum+ostaa+tukholmassa+asiakkaiden+ylijaamalampoa/a2164500>. [Haettu 22 9 2014].
- [89] Fortum Oyj, "Öppen spotvärme," 2013. [Online]. <http://oppenfjarrvarme.fortum.se/produkter/oppen-spotvarme/>. [Haettu 26. 9. 2014].
- [90] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, Kaukolämmön käsikirja, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, p. 385.
- [91] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, Kaukolämmön käsikirja, osa/vuosik. Lämmitysvoimalaitokset, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, pp. 293-311.
- [92] [https://www.e-education.psu.edu/egee401/content/p7\\_p5.html](https://www.e-education.psu.edu/egee401/content/p7_p5.html). [Online].
- [93] S. Mohammadi, "Conversion of existing district heating grids to low-temperature operation and extension to new areas of buildings," tekijä: *The first seminar for 4DH Ph.D. fellows*, Ålborg, 2013.
- [94] Energiateollisuus ry, Kaukolämpö, Kaukolämmön käsikirja, A. Nuorkivi, Toim., Helsinki: Kirjapaino Libris Oy, 2006, p. 385.
- [95] Työ- ja elinkeinoministeriö Energiaosasto, *Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28 EY mukaisesti*, 2010.
- [96] Energiateollisuus ry, "Tilausteho ja -vesivirta määrittäminen ja tarkistaminen Suositus K15/1998," 1998.
- [97] Euroopan Unioni, "Europe 2020," [Online]. [http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index\\_fi.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_fi.htm). [Haettu 6 11 2014].
- [98] Federation of Heating Ventilation and Air Conditioning Associations, "Technical definition for nearly zero energy buildings," [Online]. <http://www.rehva.eu/publications-and-resources/hvac-journal/2013/032013/technical-definition-for-nearly-zero-energy-buildings/>. [Haettu 13 3 2015].
- [99] K. Krysztoz, J. Heikkinen, J. Shemeikka, A. Laitinen, M. Rämä ja K. Sipilä, "Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut," VTT, 2009.

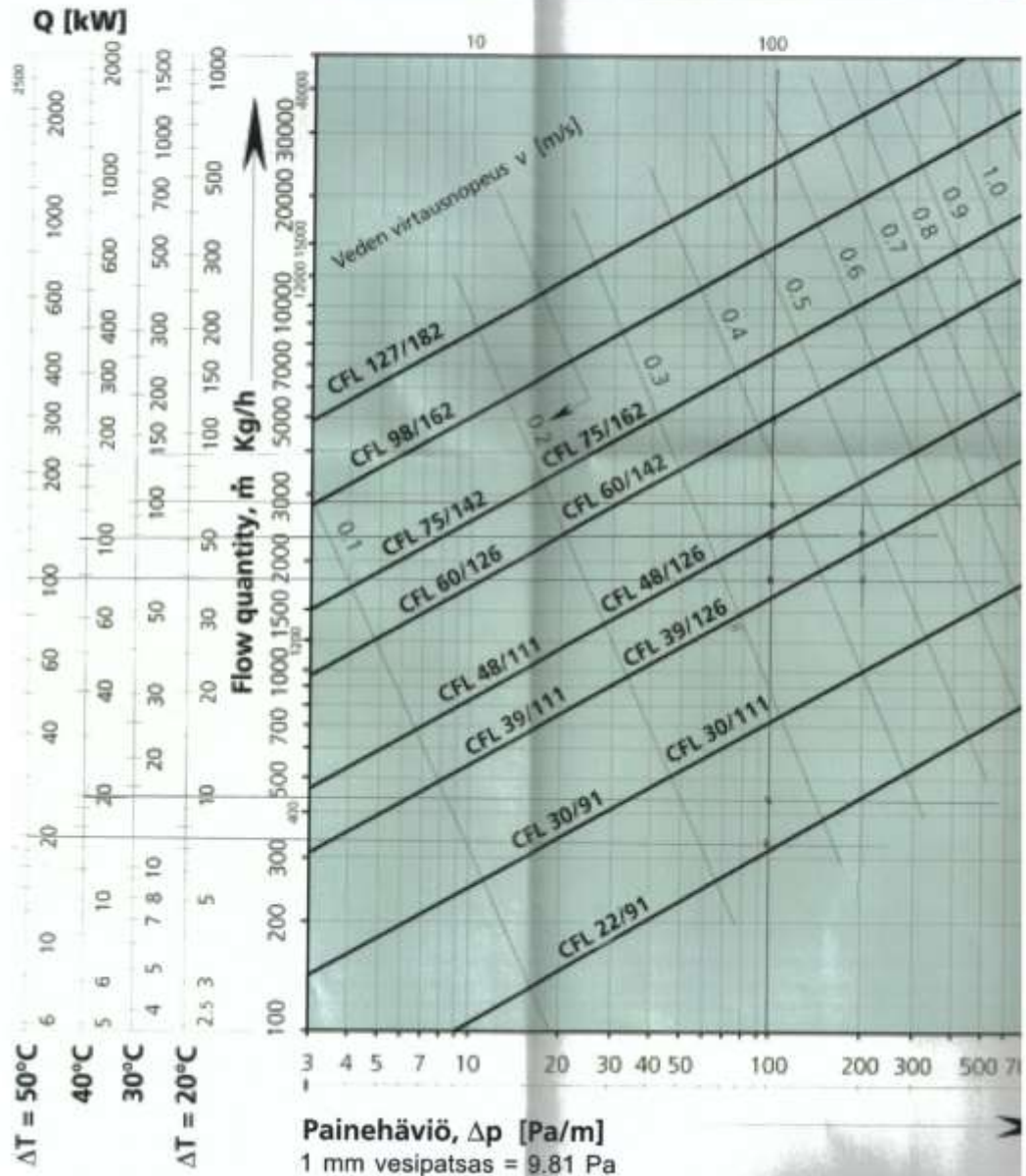
## Liite 1 Erään lämpöputkivalmistajan putkien painehäviökuvaaja



# Veden keskilämpötila 80 °C

$$\dot{m} = \frac{Q \cdot 860}{\Delta T}$$

$\dot{m}$  = virtaama kg/h  
 $Q$  = tehontarve kW  
 $\Delta T$  = lämpötilaero, meno/paluu °C



## Liite 2: Kiinteistöyhtiön omistamien talojen lämmönkulutusten korre-laatiomatriisi

		302	304	306	308	310	312	314	316	318	320	322	324	326	328	332	334	336	338	340	342	344	346	348	350	352	356	362	KOY	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	29	30	
	302 Kemian teknikka, Kemistintie 1.	1	1,00	0,92	0,94	0,87	0,91	0,94	0,96	0,90	0,85	0,96	0,98	0,90	0,90	0,95	0,95	0,99	0,82	0,95	0,92	0,79	0,97	0,92	0,94	0,84	0,81	0,79	0,62	0,26
	304 Kirjasto, Otaniementie 9	2	0,92	1,00	0,94	0,91	0,92	0,94	0,93	0,91	0,88	0,94	0,92	0,92	0,90	0,95	0,93	0,93	0,88	0,90	0,94	0,73	0,93	0,91	0,92	0,88	0,85	0,84	0,63	0,28
	306 Kone- ja rakennustekn. Osasto, Otakaari 4	3	0,94	0,94	1,00	0,94	0,94	0,97	0,93	0,90	0,91	0,97	0,93	0,95	0,93	0,97	0,95	0,94	0,92	0,91	0,96	0,75	0,94	0,94	0,95	0,90	0,88	0,88	0,64	0,31
	308 Tuotanto- ja materiaalitkn. Puumiehenuja 3	4	0,87	0,91	0,94	1,00	0,91	0,95	0,88	0,88	0,92	0,94	0,86	0,95	0,94	0,94	0,89	0,88	0,94	0,85	0,94	0,73	0,90	0,94	0,93	0,94	0,90	0,92	0,69	0,22
	310. Kone- ja rakennustekn. Puumiehenuja 5	5	0,91	0,92	0,94	0,91	1,00	0,93	0,93	0,86	0,92	0,94	0,91	0,92	0,89	0,95	0,94	0,92	0,88	0,92	0,92	0,74	0,91	0,90	0,94	0,90	0,89	0,86	0,68	0,33
	312 Energia- ja virtitekn.laboratorio, Sähkömiehentie 4	6	0,94	0,94	0,97	0,95	0,93	1,00	0,94	0,92	0,91	0,97	0,94	0,96	0,94	0,97	0,95	0,94	0,92	0,92	0,92	0,77	0,95	0,95	0,96	0,91	0,88	0,90	0,68	0,31
	314 Meriteknikanlab. Tietotie 1	7	0,96	0,93	0,93	0,88	0,93	0,94	1,00	0,89	0,87	0,94	0,96	0,90	0,90	0,94	0,94	0,97	0,84	0,94	0,94	0,77	0,94	0,90	0,92	0,85	0,82	0,80	0,64	0,25
	316 Maarintalo, Sähkömiehentie 3	8	0,90	0,91	0,90	0,88	0,86	0,92	0,89	1,00	0,82	0,92	0,89	0,91	0,87	0,93	0,89	0,90	0,87	0,86	0,93	0,70	0,91	0,89	0,88	0,82	0,81	0,83	0,61	0,25
	318 Materiaali ja kalliotekn.osasto, Vuorimiehentie 2	9	0,85	0,88	0,91	0,92	0,92	0,91	0,87	0,82	1,00	0,90	0,85	0,90	0,89	0,91	0,88	0,85	0,91	0,87	0,89	0,72	0,86	0,89	0,93	0,93	0,91	0,89	0,70	0,26
	320 Nano. Puumiehenuja 2	10	0,96	0,94	0,97	0,94	0,94	0,97	0,94	0,92	0,90	1,00	0,96	0,95	0,91	0,97	0,97	0,96	0,89	0,94	0,97	0,75	0,96	0,94	0,97	0,90	0,87	0,90	0,65	0,34
	322 Puunjalostusosasto, Vuorimiehentie 1	11	0,98	0,92	0,93	0,86	0,91	0,94	0,96	0,89	0,85	0,96	1,00	0,89	0,88	0,94	0,96	0,98	0,81	0,96	0,92	0,79	0,96	0,90	0,93	0,83	0,80	0,79	0,62	0,33
	324 Pui 2, Teknillintie 3	12	0,90	0,92	0,95	0,95	0,92	0,96	0,90	0,91	0,90	0,95	0,89	1,00	0,91	0,95	0,91	0,90	0,95	0,86	0,97	0,71	0,91	0,94	0,93	0,90	0,88	0,91	0,63	0,29
	326 Päärakennus, Otakaari 1	13	0,90	0,90	0,93	0,94	0,89	0,94	0,90	0,87	0,89	0,91	0,88	0,91	1,00	0,93	0,86	0,90	0,90	0,85	0,91	0,83	0,91	0,94	0,89	0,90	0,86	0,84	0,72	0,08
	328 Rakennus- ja yhdyskunta tekn., Rakentajanaukio 4	14	0,95	0,95	0,97	0,94	0,95	0,97	0,94	0,93	0,91	0,97	0,94	0,95	0,93	1,00	0,95	0,95	0,92	0,93	0,96	0,78	0,96	0,95	0,94	0,90	0,88	0,88	0,70	0,28
	332 Sähköteknikan osasto, Otakaari 5	16	0,95	0,93	0,95	0,89	0,94	0,95	0,94	0,89	0,88	0,97	0,96	0,91	0,86	0,95	1,00	0,96	0,85	0,95	0,94	0,73	0,94	0,90	0,95	0,87	0,83	0,85	0,62	0,44
	334 Teknisen fysiikan osasto, Rakentajanaukio 2	17	0,99	0,93	0,94	0,88	0,92	0,94	0,97	0,90	0,85	0,96	0,98	0,90	0,90	0,95	0,96	1,00	0,82	0,96	0,92	0,80	0,97	0,92	0,94	0,85	0,82	0,80	0,63	0,27
	336 Tietoteknikan talo, Konemiehentie 2	18	0,82	0,88	0,92	0,94	0,88	0,92	0,84	0,87	0,91	0,89	0,81	0,95	0,90	0,92	0,85	0,82	1,00	0,79	0,92	0,66	0,85	0,91	0,89	0,90	0,88	0,91	0,63	0,22
	338 Tila ja turvallisuusasiat, Konemiehentie 4	19	0,95	0,90	0,91	0,85	0,92	0,92	0,94	0,86	0,87	0,94	0,96	0,86	0,85	0,93	0,95	0,96	0,79	1,00	0,90	0,78	0,93	0,86	0,93	0,83	0,82	0,79	0,66	0,33
	340 , Tuotantotalouden os. uudisrak., Otaniementie 17	20	0,92	0,94	0,96	0,94	0,92	0,97	0,92	0,93	0,89	0,97	0,92	0,97	0,91	0,96	0,94	0,92	0,92	0,90	1,00	0,72	0,94	0,93	0,94	0,89	0,86	0,90	0,64	0,31
	342 Vesilab., Tietotie 1E	21	0,79	0,73	0,75	0,73	0,74	0,77	0,77	0,70	0,72	0,75	0,79	0,71	0,83	0,78	0,73	0,80	0,66	0,78	0,72	1,00	0,77	0,77	0,74	0,71	0,70	0,62	0,80	0,16
	344 Lämpömiehentie 2	22	0,97	0,93	0,94	0,90	0,91	0,95	0,94	0,91	0,86	0,96	0,96	0,91	0,91	0,96	0,94	0,97	0,85	0,93	0,94	0,77	1,00	0,93	0,94	0,87	0,85	0,83	0,64	0,28
	346 Lämpömiehentie 3	23	0,92	0,91	0,94	0,94	0,90	0,95	0,90	0,89	0,89	0,94	0,90	0,94	0,94	0,95	0,90	0,92	0,91	0,86	0,93	0,77	0,93	1,00	0,92	0,91	0,87	0,88	0,68	0,20
	348 Metallimiehenuja 10	24	0,94	0,92	0,95	0,93	0,94	0,96	0,92	0,88	0,93	0,97	0,93	0,93	0,89	0,94	0,95	0,94	0,89	0,93	0,94	0,74	0,94	0,92	1,00	0,92	0,88	0,90	0,65	0,36
	350 Betonimiehenuja 1	25	0,84	0,88	0,90	0,94	0,90	0,91	0,85	0,82	0,93	0,90	0,83	0,90	0,90	0,90	0,87	0,85	0,90	0,83	0,89	0,71	0,87	0,91	0,92	1,00	0,93	0,92	0,69	0,24
	352 Betonimiehenuja 3	26	0,81	0,85	0,88	0,90	0,89	0,88	0,82	0,81	0,91	0,87	0,80	0,88	0,86	0,88	0,83	0,82	0,88	0,82	0,86	0,70	0,85	0,87	0,88	0,93	1,00	0,89	0,70	0,25
	356 Betonimiehenuja 5	27	0,79	0,84	0,88	0,92	0,86	0,90	0,80	0,83	0,89	0,90	0,79	0,91	0,84	0,88	0,85	0,80	0,91	0,79	0,90	0,62	0,83	0,88	0,90	0,92	0,89	1,00	0,62	0,33
	362, OIH Maarintalo Otaniementie 10-11	29	0,62	0,63	0,64	0,69	0,68	0,68	0,64	0,61	0,70	0,65	0,62	0,63	0,72	0,70	0,62	0,63	0,63	0,66	0,64	0,80	0,64	0,68	0,65	0,69	0,70	0,62	1,00	0,13
	KOY Otaniemen Tiedesunnnot Fortum-FTP	30	0,26	0,28	0,31	0,22	0,33	0,31	0,25	0,25	0,26	0,34	0,33	0,29	0,08	0,28	0,44	0,27	0,22	0,33	0,31	0,16	0,28	0,20	0,36	0,24	0,25	0,33	0,13	1,00